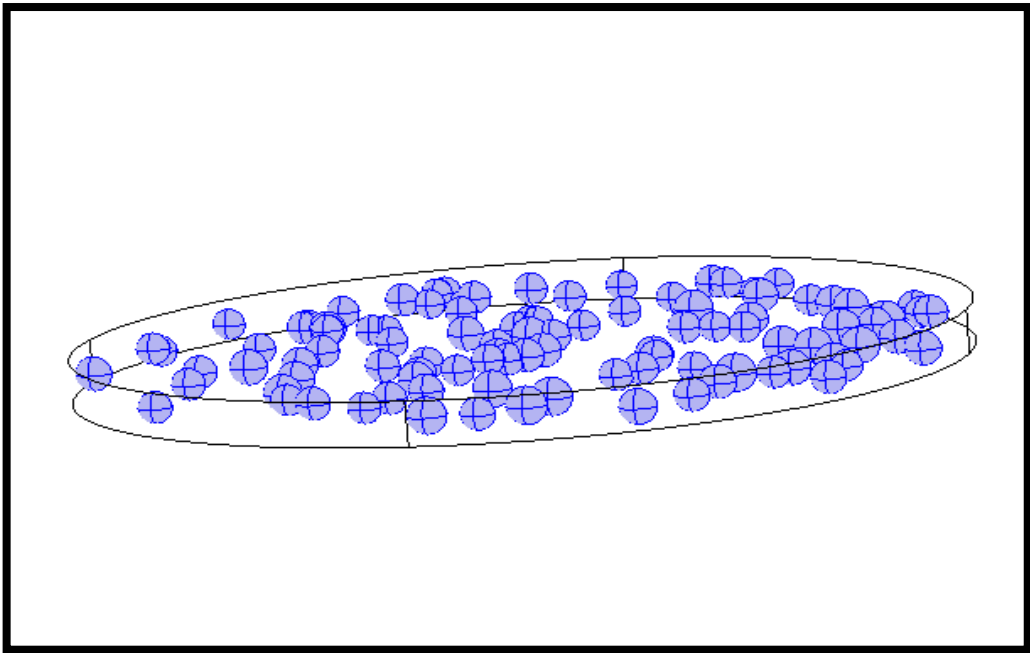


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΛΟΠΟΝΗΣΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μελέτη θερμικών ιδιοτήτων ετερογενών
μονωτικών υλικών

Τσαγκαράτου Χαρά



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Καλαράκης Αλέξανδρος

ΠΑΤΡΑ 2023

Εσκεμμένα κενή σελίδα

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	1
SUMMARY	3
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 Εισαγωγή στην θερμομόνωση και ορισμοί	9
1.1 Ροή Θερμότητας στα βιώσιμα κτίρια	9
1.2 Η σημασία της θερμομόνωσης	10
1.3 Επιλογή υλικού θερμομόνωσης.....	11
1.4 Εξωτερική θερμομόνωση	13
1.5 Υλικά που χρησιμοποιούνται για θερμοπρόσοψη	14
1.6 Ορισμοί.....	15
1.7 Βασικά στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις.....	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 Περιγραφή και δημιουργία γεωμετρικών απεικονίσεων σε ετερογενή υλικά	25
2.1 Βήματα για τη δημιουργία γεωμετρίας στο comsol.....	25
2.2 Περιγραφή της υπό μελέτη γεωμετρίας της παρούσας εργασίας.....	30
2.3 Δομές με διαφορετικό πλήθος σφαιρών.....	36
2.4 Διακριτοποίηση-Meshing.....	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Προσομοίωση Μετάδοσης θερμότητας	45
3.1 Μετάδοση θερμότητας σε στερεά υλικά.....	45
3.2 Προσδιορισμός θερμοκρασίας σε ένα σημείο του μέσου	46
3.3 Μονοδιάστατη αγωγή και οριακές συνθήκες	47
3.4 Μεθοδολογία επίλυσης θερμικής αγωγής στον εξομοιωτή.....	49
Δοκιμαστική προσομοίωση σε δομή 10 σφαιρών.....	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 Προσομοιώσεις- Αποτελέσματα	53
4.1 Επίλυση προβλήματος θερμικής αγωγής στον εξομοιωτή	53
Δομή 100 σφαιρών	53
Δομή 500 σφαιρών	57
Δομή 800 σφαιρών	61
Δομή 1000 σφαιρών	62

4.3	Αποτελέσματα και Συμπεράσματα	62
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 Συμπεράσματα – Προτάσεις μελλοντικής εργασίας		65
5.1	Σύγκριση προσομοιώσεων σε τομή μικροσκοπικής απεικόνισης	65
5.2	Προτάσεις για μελλοντική εργασία	66
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ		69

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η ενίσχυση θερμομόνωσης μετά το χτίσιμο του σπιτιού με αερογέλη. Αυτό θα επιτευχθεί με τη δημιουργία επιχρίσματος αποτελούμενου από δύο ετερογενή υλικά (Αερογέλη και τσιμεντοκονία). Η ανάμειξη των δύο αυτών υλικών θα βοηθήσει να μειώσουμε την είσοδο ροής θερμότητας στο εσωτερικό του σπιτιού λόγω του χαμηλού συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας που έχει η αερογέλη σίλικας. Έτσι θα επιτευχθεί καλύτερη μόνωση του κτιρίου.

Η ανάλυση της μελέτης που προαναφέρθηκε έχει χωριστεί σε τέσσερα κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο το οποίο είναι θεωρητικού περιεχομένου περιγράφονται πληροφορίες σχετικά με τη δομή και την πιθανή χρήση της αερογέλης που είναι το βασικό αντικείμενο της δεδομένης έρευνας αλλά και άλλοι ορισμοί που θεωρούνται απαραίτητοι.

Στο δεύτερο Κεφάλαιο αναγράφεται μια συνοπτική περιγραφή των βημάτων που χρειάζονται για να δημιουργηθεί μια γεωμετρία στο πρόγραμμα comsol, αλλά και την προβολή της γεωμετρίας που θα μελετηθεί στην τρέχουσα εργασία.

Στο τρίτο Κεφάλαιο συμπεριλαμβάνονται τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης των επιλεχθέντων υλικών, η τελική τιμή της θερμικής αγωγιμότητας του ετερογενούς υλικού και η επίδραση τους στα ορισμένα όρια θερμοκρασιών.

Στο τέταρτο Κεφάλαιο περιλαμβάνει το σύνολο των προσομοιώσεων που έλαβαν χώρα για να ολοκληρωθεί η παρούσα εργασιακή μελέτη και τα αποτελέσματα αυτών.

Στο πέμπτο και τελευταίο Κεφάλαιο της πτυχιακής εργασίας παρουσιάζονται συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική εργασία .

Εσκεμμένα κενή σελίδα

SUMMARY

The objective of this study is to improve the thermal insulation of a construction using aerogel as an insulating material. This is going to be achieved by creating a coating consisting of two heterogeneous materials (aerogel and cement mortar). The mixing of these two materials will help to reduce the heat flow inside the house due to the low thermal conductivity coefficient of the silica aerogel. This will provide improved insulation of the building.

The analysis of the study mentioned above has been organized into four sections. The first section is of theoretical content in which information on the structure and possible use of the aerogel, which is the main subject of the given research, is described, as well as other definitions that are considered necessary.

The analysis of the study mentioned above has been divided into four sections. The first section presents the physicochemical properties and structure of the aerogel, which is the main subject of this research. In addition, illustrative uses of silica aerogel in insulating materials are mentioned.

The second section contains a brief description of the steps needed to create a geometry in comsol, and the representation of the geometry that will be studied in the present work.

The third section contains the results of the modeling of the selected materials, the estimation of the final value of the thermal conductivity of the heterogeneous material and their behavior at certain temperature differences.

The four chapter, all the simulations conducted to completed the present study are presented along with their results.

The final section of this paper presents the simulations carried out in order to complete this study and summarizes the results of the simulations, with a brief discussion and conclusions.

Εσκεμμένα κενή σελίδα

Υπεύθυνη Δήλωση Φοιτητή: Η κάτωθι υπογεγραμμένη Φοιτήτρια έχω επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, έχω δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μου όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησα και έλαβα ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνω επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχω ενσωματώσει στην εργασία μου προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχω πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχω αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Ο Φοιτήτρια
Χαρίκλεια Τσαγκαράτου

.....

(Υπογραφή)

Εσκεμμένα κενή σελίδα

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στην παρούσα μελέτη θα εξεταστεί η θερμική συμπεριφορά της αερογέλης ως υλικό υψηλής θερμικής απόδοσης, καθώς και επειδή έχει χαμηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας ικανό για τη μόνωση κτιρίων υψηλών θερμομονωτικών απαιτήσεων. Επιπλέον, θα παρατηρηθεί η συμπεριφορά της αερογέλης σε διαφορετικό ποσοστό πορώδους συνδυαστικά με την τσιμεντοκονία και την επίδραση που έχει τελικά το αναμειγνυόμενο υλικό σε συγκεκριμένο όριο θερμοκρασιών που θα οριστεί παρακάτω και ο τελικός συντελεστής θερμικής απόδοσης. Η μελέτη αυτή θα παρατηρηθεί μέσω ποικίλων προσομοιώσεων με τη βοήθεια του προγράμματος comsol που έχει επιλεγεί για τη δεδομένη έρευνα. Επιπροσθέτως, οι προσομοιώσεις που θα ακολουθήσουν περιλαμβάνουν τη μοντελοποίηση του υπό μελέτη μεγέθους και την απεικόνιση του με εικόνες.

Στην μελέτη που ακολουθεί θα εκμεταλλευτούμε την αερογέλη για να βελτιώσουμε την εισαγωγή θερμότητας σε ένα κτίριο χρησιμοποιώντας την ως επίχρισμα μόνωσης, θέτοντας την ως το πορώδες του αναμειγνυόμενου υλικού. Το πορώδες συμβολίζεται με σχήμα σφαιρών για να μπορεί να μελετηθεί πιο εύκολα. Η τσιμεντοκονία απεικονίζεται με το σχήμα κυλίνδρου το οποίο καλύπτει το πορώδες εξωτερικά και ανάμεσα στις σφαίρες.

Συμβολισμοί

RIND_THICKNESS = το όριο που μπορούν να απέχουν οι σφαίρες από τον άκρη του κυλίνδρου ώστε να μην βγαίνουν έξω από την επιφάνεια.

HEIGHT: ύψος κυλίνδρου

RADIUS: διάμετρος κυλίνδρου

T: θερμοκρασία

$V = \pi r^2 H$: όγκος κυλίνδρου

k_m [W/m*K]: συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας τσιμέντου

k_i [W/m*K]: συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας αερογέλης

$k_{m,i}$: ισοδύναμος συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας ετερογενούς υλικού

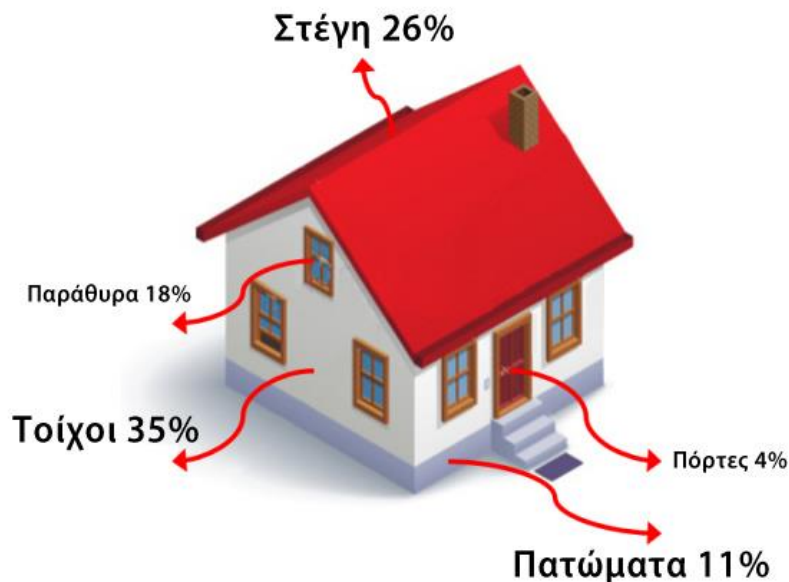
Λέξεις κλειδιά: Αερογέλη, Θερμική μόνωση, μοντελοποίηση μεταφοράς θερμότητας, τσιμεντοκονίαμα, Ετερογενή μονωτικά υλικά.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή στην θερμομόνωση και ορισμοί

1.1 Ροή Θερμότητας στα βιώσιμα κτίρια

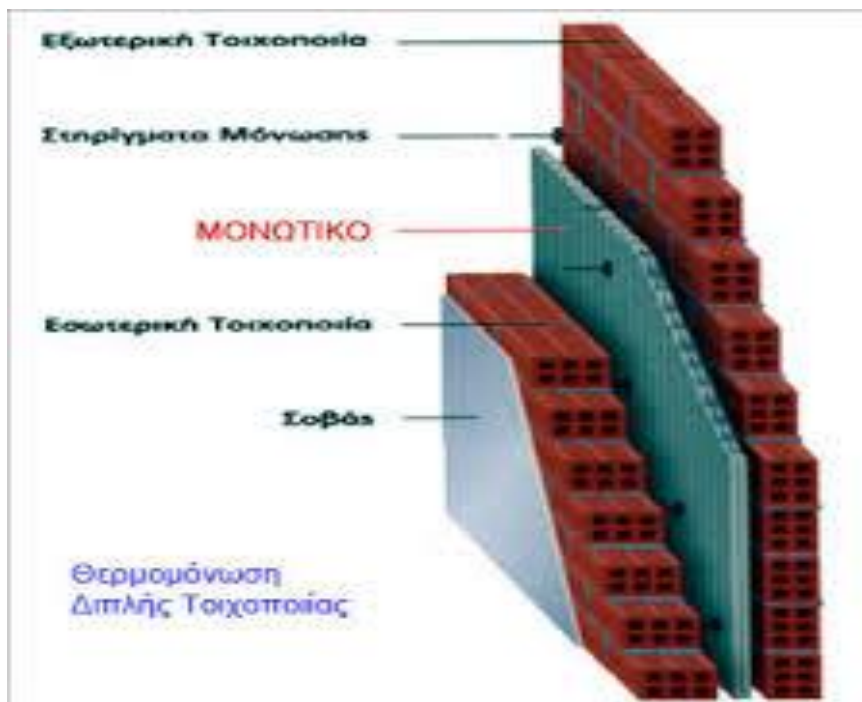
Η ύπαρξη ροής θερμότητας στα κτίρια δημιούργησε την ανάγκη του ανθρώπου να εφεύρει και να χρησιμοποιήσει εγκαταστάσεις θέρμανσης και ψύξης. Η ροή αυτή μπορεί να οριστεί και ως απώλεια θερμότητας η οποία οφείλεται στην ύπαρξη χαραμάδων στους τοίχους, στα παράθυρα και γενικότερα στα ανοίγματα ή υλικά που επιτρέπουν την είσοδο ή την έξοδο θερμότητας από το χώρο ενός κτιρίου. Η κάλυψη αυτών των απωλειών αυξάνει το κόστος εγκατάστασης μιας οικοδομής. Γι' αυτό το λόγο η εφαρμογή θερμομόνωσης θεωρείται απαραίτητη για την μείωση της εισροής θερμότητας και τη μείωση του κόστους θέρμανσης-ψύξης μιας κατοικίας. Παρακάτω απεικονίζονται οι απώλειες που μπορεί να έχει μια οικία.



Σχήμα 1.1: Πιθανές Απώλειες ροής θερμότητας μιας οικίας [1]

1.2 Η σημασία της θερμομόνωσης

Η θερμομόνωση αποτελεί ύψιστης σημασίας ενέργεια για τις κατασκευές κτιρίων αφού ιδιότητά της είναι να εμποδίζει ή να δυσκολεύει την είσοδο του κρύου ή της ζέστης στο χώρο και την έξοδο του αντίστοιχα. Έτσι, επιτυγχάνεται η διατήρηση της επιθυμητής θερμοκρασίας στο χώρο, χρησιμοποιώντας λιγότερο τις συσκευές θέρμανσης-κλιματισμού και μειώνοντας έτσι το συνολικό κόστος εξόδων της οικίας. Με άλλα λόγια η θερμομόνωση μειώνει την ροή θερμότητας, ώστε να επιφέρει μικρότερες αλλαγές θερμοκρασίας στο χώρο. Η θερμομόνωση εφαρμόζεται ανάμεσα στα τοιχώματα αυξάνοντας το πάχος του μονωτικού υλικού. Έτσι αυξάνεται το συνολικό πάχος του τοιχώματος. Η προσθήκη μόνωσης ανάλογα το πάχος μπορεί να επιφέρει έως και μηδενική ροή θερμότητας. Η χρήση επιπλέον μονωτικού μπορεί να επιβαρύνει σημαντικά το τελικό κόστος κατασκευής. Παρόλα αυτά, η εξοικονόμηση ενέργειας του κτιρίου μελλοντικά αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την αύξηση του κόστους κατά τη διάρκεια χτισίματος ενός βιώσιμου κτιρίου. Κάθε κτίριο έχει τις δικές του ανάγκες για θερμομόνωση ανάλογα με το πόσο μεγάλες ή μικρές είναι οι θερμοκρασίες σε σχέση με το κλίμα της περιοχής. Οι βελτιώσεις που μπορούμε να πετύχουμε με τη μόνωση κατανέμονται από 30%-60% ανάλογα με το αν αυτή εφαρμόζεται σε νέες ή ήδη υπάρχουσες κατασκευές. Η θερμομόνωση μπορεί να εφαρμοστεί είτε εσωτερικά στα τοιχώματα του σπιτιού συνήθως σε νέες κατασκευές είτε εξωτερικά σε ήδη υπάρχουσες με τη χρήση επιχρίσματος. Παρακάτω απεικονίζεται αναλυτικά πως ακριβώς εφαρμόζεται η εσωτερική μόνωση στην πράξη.



Σχήμα 1.2.: Παράδειγμα Εσωτερικής Θερμομόνωσης Σπιτιού
(Πηγή: Μονώσεις Αλεξιάδης [2])

1.3 Επιλογή υλικού θερμομόνωσης

Υπάρχουν ποικίλα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται για τη μόνωση ενός κτιρίου. Κάθε ένα από αυτά έχει τα δικά του χαρακτηριστικά τα οποία το κάνουν περισσότερο ή λιγότερο αποδοτικό. Η απόδοση των υλικών εξαρτάται από έναν συντελεστή που ονομάζεται συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας. Όσο μικρότερη τιμή έχει τόσο καλύτερη μόνωση θα εξασφαλίσει στην κατασκευή. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η θερμική αγωγιμότητα διαφόρων υλικών.

Πίνακας (B)

ΥΛΙΚΟ	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ λ (w/m.K)	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ρ kg/ m ³	ΕΙΔΙΚΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ c (kJ/kg.K)
Τούβλο	0,727	1922	0,84
Ασβεστοκονίαμα	0,87	1800	1
Γυψοσανίδα	0,42	900	1
Οπλισματό Σκυρόδεμα	1,731	2243	0,84
Απλό Σκυρόδεμα	2,1	2400	1
Υαλοβάμβακας	0,04-0,05	40-80	1
Πολυουρεθάνη	0,031	40	2,09
Πετροβάμβακας	0,038-0,05	80	0,9
Διογκ. Πολυστερίνη	0,032-0,037	18-20	1,25
Εξηλ. Πολυστερίνη	0,032-0,034	20-25	1,25
Γρανίτης	3,5	2800	1
Μάρμαρο	3,5	2800	1
Πέτρα	0,87	1400	1
Χάλυβας	1,8	7800	0,45
Αλουμίνιο	200	2700	0,92
Χαλκός	372	8300	0,45
Άμμος	0,33	1520	0,80
Άσφαλτος	0,74	2110	0,92
Γυαλί	1	2230	0,84
Γύψος	0,43	1200	1,05

Σχήμα 1.3: Θερμική Αγωγιμότητα Διαφόρων υλικών (Πηγή: Bioclima [3])

Η θερμική αγωγιμότητα του υλικού καθορίζει τη ροή θερμότητας που μεταδίδεται στο χώρο μέσω μιας ιδιότητας που ονομάζεται αγωγή και υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\dot{Q}_{wall} = k \cdot A \cdot \frac{\theta_1 - \theta_2}{L}, \quad (1.)$$

όπου k είναι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας,

$\theta_1 - \theta_2$: συμβολίζεται η διαφορά θερμοκρασίας του εξωτερικού τοίχου με του εσωτερικού,

L: το συνολικό μήκος του τοίχου και

A: το εμβαδόν του.

Ο συντελεστής του υλικού που χρησιμοποιείται για τη θερμομόνωση είναι διαφορετικός από αυτόν του τοίχου. Ακολουθεί ένα παράδειγμα υπολογισμού της ροής θερμότητας με θερμομόνωση.

$$Q = \frac{1}{\frac{1}{a_i} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \dots + \frac{d_v}{\lambda_v} + \frac{1}{a_a} + \frac{1}{a_e}} S(\theta_1 - \theta_2)$$

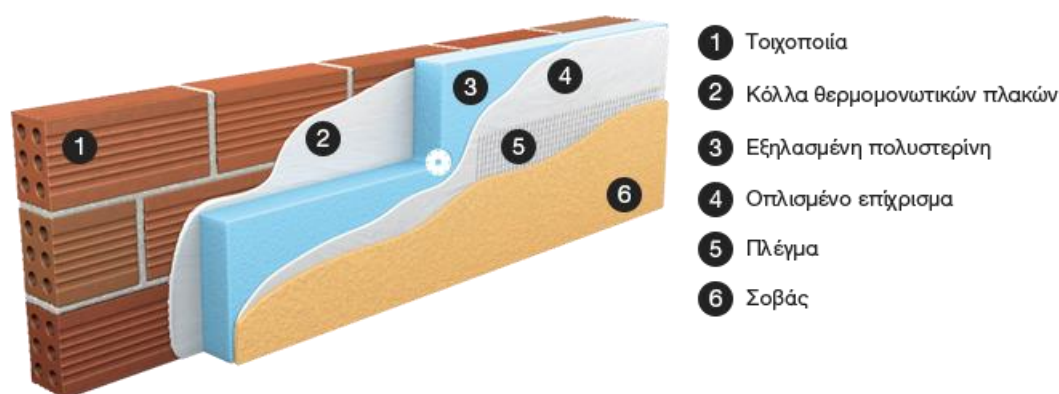
Όπου:
S σε m², η επιφάνεια του τοίχου
*θ*₁ σε C, εσωτερική θερμοκρασία
*θ*₂ σε C, εξωτερική θερμοκρασία
Q σε W ή kcal/h, το ποσό της θερμότητας που διέρχεται από τον τοίχο
*a*_i σε W/m²K ή kcal/hm² C, συντελεστής θερμικής μετάβασης εσωτερικού ρευστού.
*a*_p σε W/m²K ή kcal/hm² C, συντελεστής θερμικής μετάβασης εξωτερικού ρευστού.
*d*₁, *d*₂, *d*₃... σε m, τα διάφορα πάχη των στρώσεων του σύνθετου τοίχου.
*λ*₁, *λ*₂, *λ*₃... σε W/mk ή kcal/hm²C, οι αντίστοιχοι συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας των υλικών των στρώσεων.
*a*_e σε W/mk ή kcal/hm²C, συντελεστής θερμικής μετάβασης στρώματος εγκλωβισμένου αέρα στον σύνθετο τοίχο.

Σχήμα 1.4: Θεωρητικό Παράδειγμα Υπολογισμού της ροής θερμότητας [4]

1.4 Εξωτερική θερμομόνωση

Εξωτερική θερμομόνωση ή θερμοπρόσοψη εφαρμόζεται σε εξωτερικές επιφάνειες κτιρίων, στα πλαϊνά των τοίχων στους κατακόρυφους εξωτερικούς τοίχους. Μπορεί να εφαρμοστεί σε νέες αλλά και ήδη υπάρχουσες εγκαταστάσεις αν ο στόχος είναι να αυξηθεί η κάλυψη των ενεργειακών απωλειών. Μια από τις σημαντικότερες ιδιότητες της θερμοπρόσοψης είναι η θωράκιση των εξωτερικών τοίχων και η εξάλειψη των θερμογεφυρών που τυχόν υπάρχουν. Έτσι, μειώνονται σημαντικά οι θερμικές απώλειες της κατοικίας από τα πλαϊνά και εξοικονομείται ένα μεγάλο ποσοστό ενέργειας που φτάνει έως και 50% της συνολικής κατανάλωσης της οικίας. Ακόμα, η προσθήκη επιχρίσματος σε ένα κτίριο προστατεύει τους τοίχους από υγρασία, ρωγμές και άλλων ειδών καταπονήσεις καθώς επίσης και από θερμοκρασιακές μεταβολές που θα υπάρχουν χωρίς την προσθήκη θερμομόνωσης. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί πως επιλέγοντας εξωτερική θερμομόνωση εξοικονομείται χώρος στο εσωτερικό του σπιτιού σε αντίθεση με την εσωτερική

θερμομόνωση που μπορεί να προκαλέσει μείωση του ωφέλιμου χώρου. Τέλος, εφαρμόζοντας σε ένα ήδη υπάρχον σπίτι θερμοπρόσοψη το ανακαινίζουμε όχι μόνο ενεργειακά αλλά και αισθητικά.



Σχήμα 1.5: Θέση Εφαρμογής επιχρίσματος (Πηγή ISOMAT[5])

1.5 Υλικά που χρησιμοποιούνται για θερμοπρόσοψη

Όπως και στην εσωτερική θερμομόνωση έτσι και στην εξωτερική η επιλογή του υλικού επιχρίσματος γίνεται με διάφορα κριτήρια. Σκοπός της επίστρωσης είναι η μείωση των απωλειών και η εξοικονόμηση ενέργειας, συνεπώς η επιλογή του υλικού θερμοπρόσοψης εξαρτάται από το πόσο κακός αγωγός της θερμότητας είναι αλλά και τη αντοχή που έχει σε καταπονήσεις αντίστοιχα. Άρα, το σημαντικότερο κριτήριο που ελέγχεται είναι η θερμική αγωγιμότητα των υλικών να είναι χαμηλή για την βέλτιστη μόνωση της οικίας. Διάφορα υλικά που χρησιμοποιούνται για την θερμομόνωση με χαμηλούς συντελεστές k φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Κάποια από αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στην εσωτερική μόνωση του σπιτιού.

Υλικό	Θερμική αγωγιμότητα (k) (W/m-K)
Χαλκός	387
Χάλυβας (μαλακός)	45.8
Τούβλο (κοινό)	0.69
Σκυρόδεμα	0.8-1.4
Γυαλί	0.76
Γυψοκονίαμα	0.48
Πολυμεθυλική μεθασετίνη	0.19
Δρυς	0.17
Πεύκο	0.14
Αμίαντος	0.15
Μονωτικές σανίδες φίμπερ	0.041
Αφρός πολυουρεθάνης	0.034
Αέρας	0.026

Σχήμα 1.6: Υλικά επιχρίσματος [6]

1.6 Ορισμοί

Τσιμεντοκονία

Τσιμεντοκονία είναι ένα υλικό στρώσης το οποίο έχει ως βασικό υλικό το τσιμέντο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επικάλυψη συγκεκριμένων επιφανειών (δαπέδου, οροφής, ταρατσών αλλά και άλλου είδους εξωτερικών επιφανειών) καθώς επίσης και για τη χρήση τεχνητής λείανσης επιφανειών. Τα υλικά της προέρχονται από φυσικές πηγές χωρίς χημική επεξεργασία άρα μπορεί να θεωρηθεί και ως ένα φιλικό προς το περιβάλλον υλικό. Αποτελείται από υψηλή θερμική αντοχή λόγω της σχετικά χαμηλής του θερμικής αγωγιμότητας με τιμή $k=0.47$ W/(m·K) η οποία εμποδίζει κατά ένα βαθμό την είσοδο θερμότητας. Επίσης, έχει πολύ υψηλή αντοχή σε συστολές και διαστολές καθώς είναι ανθεκτικό στην είσοδο υγρασίας. Για αυτό, χρησιμοποιείται συχνά σε βιομηχανίες, οικίες και γενικά για εγκαταστάσεις υψηλών θερμικών αλλά και μηχανικών αναγκών.



Σχήμα 1.7: Πατητή Τσιμεντοκονία για τη χρήση θερμομόνωσης [7]

Παρακάτω αναφέρονται κάποιες χρήσιμες ιδιότητες της τσιμεντοκονίας ως έτοιμος σοβάς που χρησιμοποιείται στην αγορά σήμερα στις διάφορες εφαρμογές της.

Ιδιότητες Τσιμεντοκονίας [5]

- Διαθέτει άριστη πρόσφυση και εξαιρετική εργασιμότητα.
- Απλοποιεί και επιταχύνει τις εργασίες.
- Είναι ιδανική και για εφαρμογή με μηχανή εκτόξευσης σοβά.
- Χαρακτηρίζεται από σταθερή ποιότητα.
- Παρέχει άριστη ικανότητα διαπνοής του δομικού στοιχείου.
- Είναι κατάλληλη για εξωτερική και εσωτερική χρήση.

Θερμική Αγωγιμότητα

Θερμική αγωγιμότητα καλείται η ιδιότητα που καθορίζει πόσο εύκολα ή δύσκολα μεταδίδεται η θερμότητα στο εσωτερικό των υλικών. Με άλλα λόγια διακρίνει τα υλικά σε καλούς ή κακούς αγωγούς θερμότητας. Η ιδιότητα αυτή εκφράζεται μέσω ενός συντελεστή (k) με την τιμή του να διαφέρει από υλικό σε υλικό. Οι μονάδες του k είναι $[W/(m \cdot K)]$ που δίνονται από τη σχέση της ροής θερμότητας που θα μελετηθεί

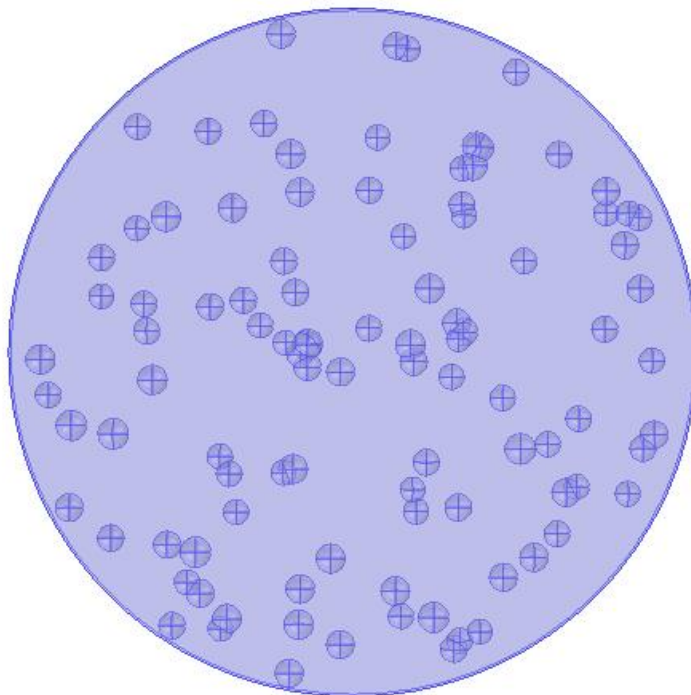
παρακάτω. Υλικά με χαμηλό συντελεστή αγωγιμότητας θεωρούνται κατάλληλα για τη θερμομόνωση κτιρίων.

Πορώδες

Πορώδες ορίζεται το μέγεθος που μετράει τον όγκο ή το ποσοστό που καλύπτει ένα υλικό μέσα ή ανάμεσα σε ένα άλλο υλικό. Πιο συγκεκριμένα, πορώδες είναι ο λόγος του συνολικού όγκου των σφαιρών αέρα προς τον όγκο του υλικού δηλαδή,

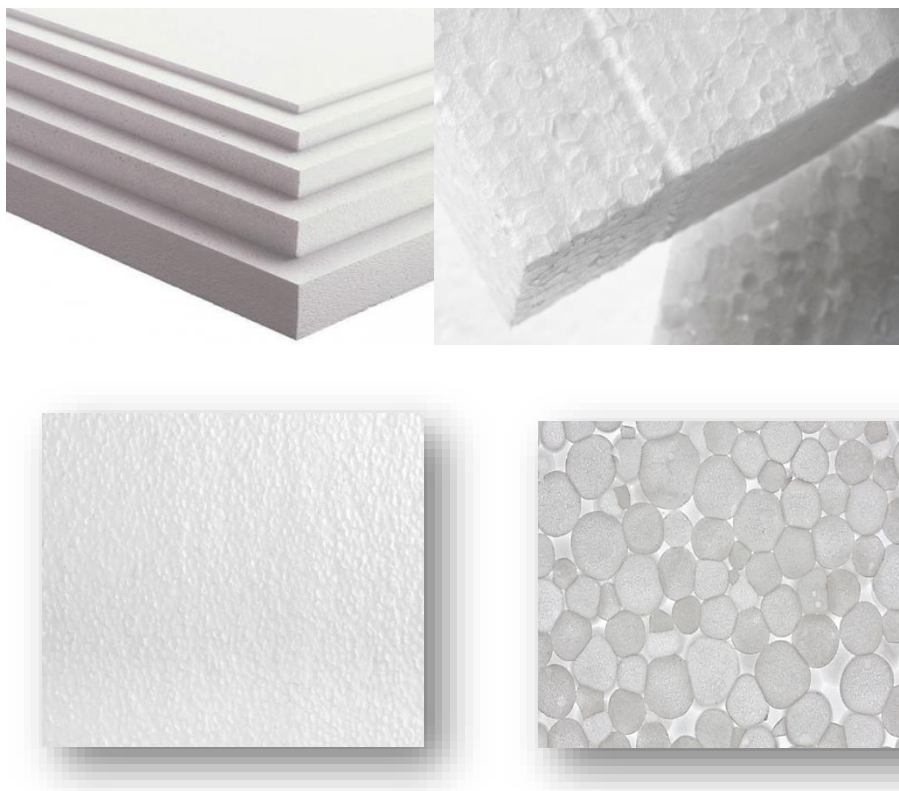
$$n\% = (V_{\text{sph}} / V_{\text{cyl}}) \times 100 \quad (2.)$$

Παρακάτω απεικονίζονται πορώδη σε διάφορες μορφές



Σχήμα 1.8: Παράδειγμα Πορώδους μοντελοποίησης

Εικόνες Πολυστερίνης



Σχήμα 1.9: Πορώδες πολυστερίνης από μακροσκοπική σε μικροσκοπική απεικόνιση [8, 9]

Η πολυστερίνη θεωρείται ένα εξίσου καλό μονωτικό επίχρισμα για την εφαρμογή εξωτερικής θερμομόνωσης. Συνήθως στην αγορά εφαρμόζεται η εξηλασμένη και διογκωμένη πολυστερίνη. Η θερμική της αγωγιμότητα κυμαίνεται από 0.034-0.038 W/(m·K). Οι θερμικές της ιδιότητες είναι μέτριες αλλά μπορεί να επιλεγθεί για την καλή αντοχή ενός κτιρίου με μέτριες θερμικές απαιτήσεις. Για αυτό το λόγο ερευνάται η εύρεση ενός υλικού που θα μπορέσει να καλύψει τις μηχανικές αλλά και τις θερμικές αντοχές ενός κτιρίου ανεξάρτητα από το πόσο υψηλές ή χαμηλές απαιτήσεις έχει.

Αερογέλη

Η αερογέλη [10], κατανέμεται ανάμεσα στα καλύτερα μονωτικά στερεά υλικά λόγω της χαμηλής της θερμικής αγωγιμότητας, η οποία μάλιστα είναι μικρότερη και από αυτή του αέρα, καθώς επίσης και λόγω του υψηλού πορώδους της. Μετά από σημαντικές έρευνες έχει διαπιστωθεί ότι εξαιτίας των υψηλά ενισχυμένων θερμικών και φυσικών ιδιοτήτων της, η αερογέλη μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κατασκευές-οικοδομές βιώσιμων κτιρίων ως μονωτικό. Επιπροσθέτως, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρόσθετο υλικό επίστρωσης υψηλής απόδοσης αφού είναι ασφαλής στην αφή. Η αερογέλη ουσιαστικά είναι ένας ναοαφρός με τη μικρότερη πυκνότητα στον πλανήτη που αποτελείται από διοξείδιο του πυριτίου SiO_2 ($1\text{ngr}/\text{cm}^3$) και παρά τη μαλακή της αφή αντέχει σε υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες 1000 φορές μεγαλύτερες από τη μάζα της και πάνω από 1300 βαθμούς Celsius, ενώ έχει τη δυνατότητα να απορροφά και την υπεριώδη ακτινοβολία. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η αερογέλη σίλικας δημιουργεί ναοδομές και μικροδομές οι οποίες με τη σειρά τους δημιουργούν μικροπορώδεις (2nm), μεσοπορώδεις (2-50nm) ή μεικτές δομές. Η αερογέλη μπορεί να φτιαχτεί σε ποικίλα σχήματα και μεγέθη ανάλογα με τη χρήση για την οποία προορίζεται. Ταξινομείται σε 3 διαφορετικούς τύπους : σκόνη, μονόλιθο ή μεμβράνη ανάλογα με το πώς εμφανίζεται. Μπορεί να ονομαστεί αερογέλη , ξηροζέλη , υδρογέλη και κρουογέλη ανάλογα με το πώς θα παραχθεί. Ανάλογα με τη δομή, δηλαδή αν είναι μικροπορώδης, μεσοπορώδης ή μεικτή, ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας της αερογέλης μπορεί να είναι πολύ χαμηλός από $19\text{ mW}/(\text{K}\cdot\text{m})$ ή πολύ ψηλός έως και $100\text{ mW}/(\text{K}\cdot\text{m})$ σύμφωνα με την εμπορική αερογέλη της εταιρίας Cabot. Η δομή της μπορεί να μελετηθεί καλύτερα αναλύοντας τη χημική της σύσταση.

Εικόνες αερογέλης σε ποικίλες μορφές



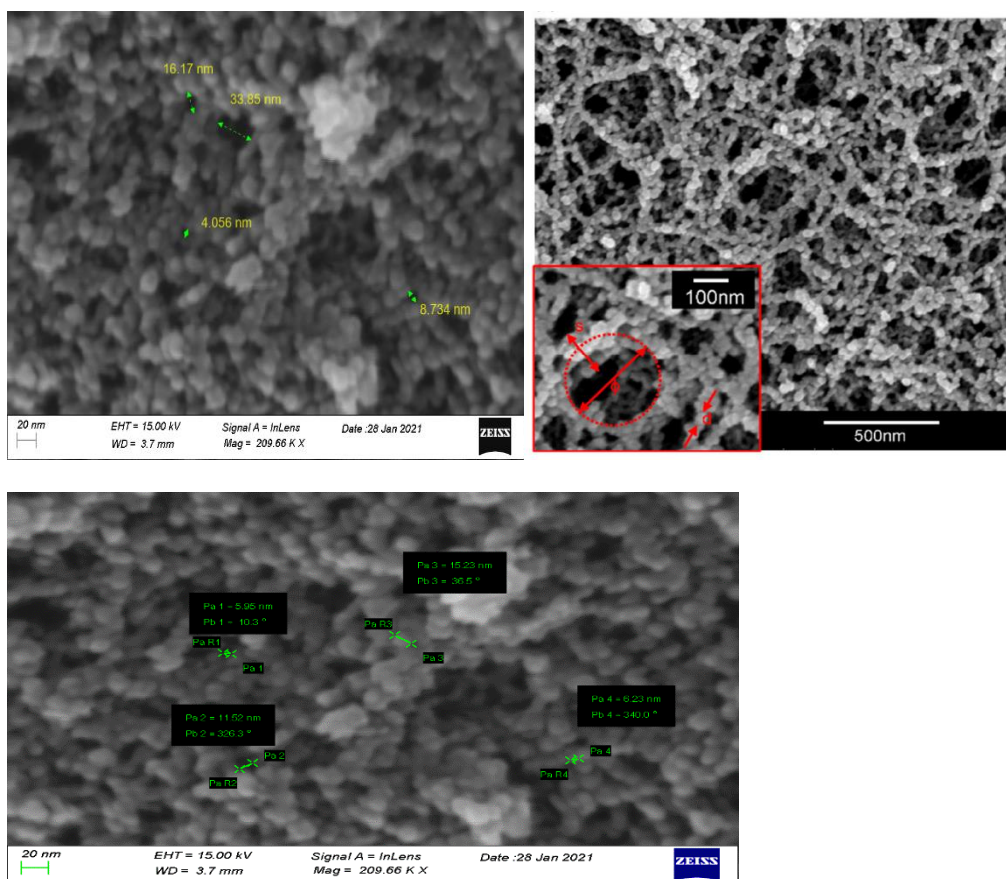
Σχήμα 1.10: Αερογέλη σε μορφή κουβέρτας έτοιμη για χρήση μόνωσης [11]

Αερογέλη σε μορφή σκόνης



Σχήμα 1.11: Σκόνη αερογέλης πυριτίου 20 nm με 50 nm – Υδροφοβική σκόνη αερογέλης αφής [12]

Η αερογέλη όπως φαίνεται ηλεκτρονικής μικροσκοπικής μορφής



Σχήμα 1.12: Εικόνες Πορώδους αερογέλης από το Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (ΗΜΣ) σε nm κλίμακα [13]

Σύμφωνα με τα δείγματα που λείφθηκαν από μετρήσεις πορώδους εργαστηριακά παρασκευασμένων αερογέλων διαπιστώθηκε πως η κατανομή των πόρων παρουσιάζει εύρος διαμέτρου 15-60 nm ενώ το μέγεθος των νανοσωματιδίων έχει εύρος 5-30nm. Στην εμπορική αερογέλη της Cabot όμως, η διάμετρος των νανοσωματιδίων κυμαίνεται από 4-10nm ενώ η διάμετρος των πόρων ταυτίζεται με αυτή του εργαστηρίου.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι διαφορετικές εφαρμογές της αερογέλης στη βιομηχανία :

- Εσωτερική και εξωτερική μόνωση : οικιών, οχημάτων, σωληνώσεων, για την συσκευασία προϊόντων και άλλων ποικίλων μονώσεων .
- Για την κατασκευή διαφόρων ηλεκτρικών εξαρτημάτων : πυκνωτών, μπαταριών, αισθητήρες ρύθμισης υγρασίας, μαλακούς μαγνήτες, κυψέλη καυσίμων.

- Τεχνολογία χυτηρίου : αερογελικά συνθετικά και κόκκοι αερογέλης για την άμμο χυτηρίου.
- Στην αρχιτεκτονική σε : ελαφριά σκυροδέματα , απεικονίσεις για τη μόνωση τοίχου και αρχιτεκτονικά ηλιακά πάνελ. κομμάτια γυαλιού και ελαστικά συστήματα οροφής.
- Φαρμακευτική για την μεταφορά φαρμάκων.
- Ηχητική μόνωση για την μείωση εισόδου εξωτερικών θορύβων.
- Θερμική μόνωση καλύπτοντας επιφάνειες για ασφαλή επαφή, καλύτερη απόδοση ενέργειας, εμποδίζει την σκουριά μέσω της μόνωσης , τις θερμικές θραύσεις και ελέγχει την συμπύκνωση.
- Μονωτικά πακέτα πετρελαίου και αερίου για υποθαλάσσιες σωληνώσεις.
- Αρχιτεκτονικά ηλιακά πάνελ. κομμάτια γυαλιού και ελαστικά συστήματα οροφής.

Εμπορική αερογέλη που είναι πιο διαδεδομένη :

Η πιο διαδεδομένη αερογέλη στο εμπόριο είναι η Silica aerogel η οποία δημιουργείται μετατρέποντας το διοξείδιο του πυριτίου σε ζελέ με τη βοήθεια του νερού και στη συνέχεια ακολουθεί η διαδικασία της ξήρανσης η οποία περιλαμβάνει θέρμανση σε αντιδραστήρα σε ορισμένο όριο θερμοκρασίας περίπου στους 250 βαθμούς Κελσίου, ασκώντας πίεση αρκετά μεγαλύτερη από αυτή της ατμόσφαιρας. Έτσι, ο αέρας αντικαθιστά τα υγρά συστατικά και δημιουργείται η κυψελώδης δομή.

Πλεονεκτήματα Αερογέλης

- Αντοχή σε υψηλές πιέσεις
- Αντοχή σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες
- Υψηλό Πορώδες 80-95%
- Χαμηλούς Συντελεστές Θερμικής αγωγιμότητας 0.02-0.04 W/mK.

Μειονεκτήματα Αερογέλης

- Εύθραυστο υλικό
- Δύσκολη σύνθεση

Χρήσεις:

- Σε κατασκευές κτιρίων κατασκευή, σε χημικές βιομηχανίες, ηλεκτρονικές, στον ιματισμό, στο αεροδιάστημα και σε άλλους τομείς.

Σύγκριση Πολυστερίνης-Αερογέλης

	<i>ΠΟΛΥΣΤΕΡΙΝΗ ΕΞΗΛΑΣΜΕΝΗ</i>	<i>ΑΕΡΟΓΕΛΗ</i>
Θερμική Αγωγιμότητα	0.03 - 0.05 W/mK.	0.02-0.04 W/mK.
Αντοχή σε πιέσεις	100 - 700 kPa	30 - 250 kPa
Αντοχή στην θερμοκρασία	75 -100 °C	70 -100 °C
Πορώδες	70-95%	80-95%
Πυκνότητα	15-50kg/m ³	10-50 kg/m ³

Πίνακας 1: Ενδεικτικές ιδιότητες αερογέλης και εξηλασμένης πολυστερίνης (τυπικές τιμές)

1.7 Βασικά στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις

Ο βασικός τρόπος μετάδοσης ενέργειας είναι η μετάδοση θερμότητας το heat transfer in solids στην περίπτωση της προαναφερόμενης μελέτης. Τα αδρανή σωματίδια της αερογέλης εισάγονται ως σφαίρες του SiO₂. ενώ ο κύριος ο όγκος στερεού είναι η τσιμεντοκονία η οποία έχει συμβολιστεί με σχήμα κυλίνδρου λόγω της θερμικής τους αγωγιμότητας είναι $k_{sph}/k_{cyl}=0.05/0.47$. Ο τελικός όγκος του κυλίνδρου μετά από ποικίλες προσομοιώσεις:

$$V=\pi \cdot R^2 \cdot L=3.1415926536 \cdot 0.22^2 \cdot 0.023=0.0034975 \mu\text{m}^3$$

Ο συνολικός όγκος και το πλήθος των σφαιρών εξαρτάται από το πορώδες κάθε προσομοίωσης που υπολογίζεται μέσω του προγράμματος comsol βασισμένο στον τύπο $V_{sph}=4/3 \cdot \pi \cdot R^3$. Η διαφορά θερμοκρασίας κατά μήκος του άξονα γγ' είναι $\Delta T=47^\circ\text{C}$, ενώ κατά μήκος των αξόνων x και z το υλικό είναι μονωμένο.

Εσκεμμένα κενή σελίδα

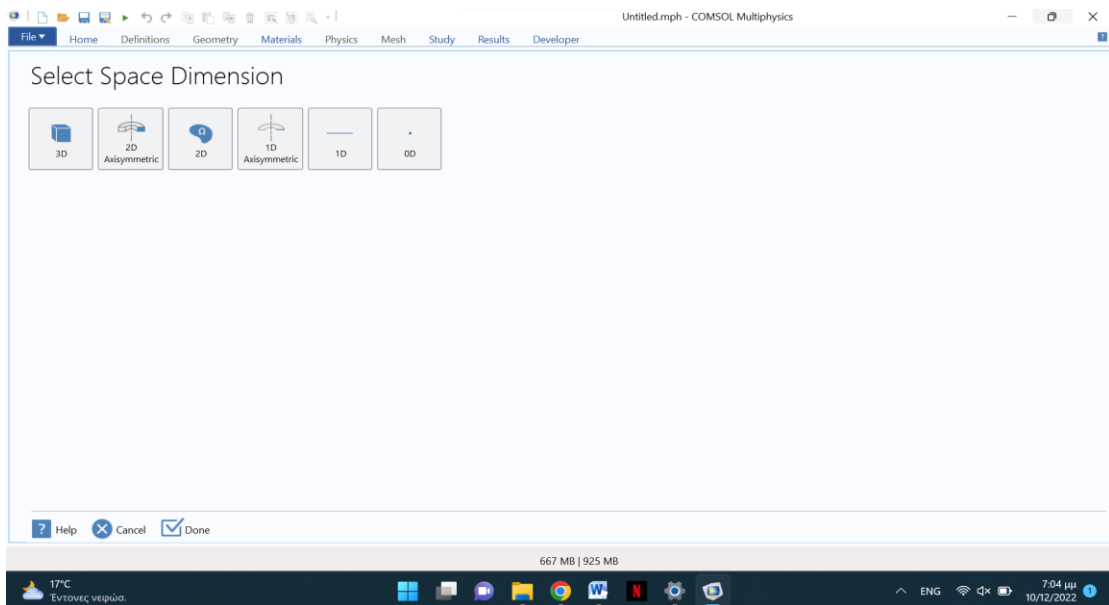
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Περιγραφή και δημιουργία γεωμετρικών απεικονίσεων σε ετερογενή υλικά

2.1 Βήματα για τη δημιουργία γεωμετρίας στο comsol

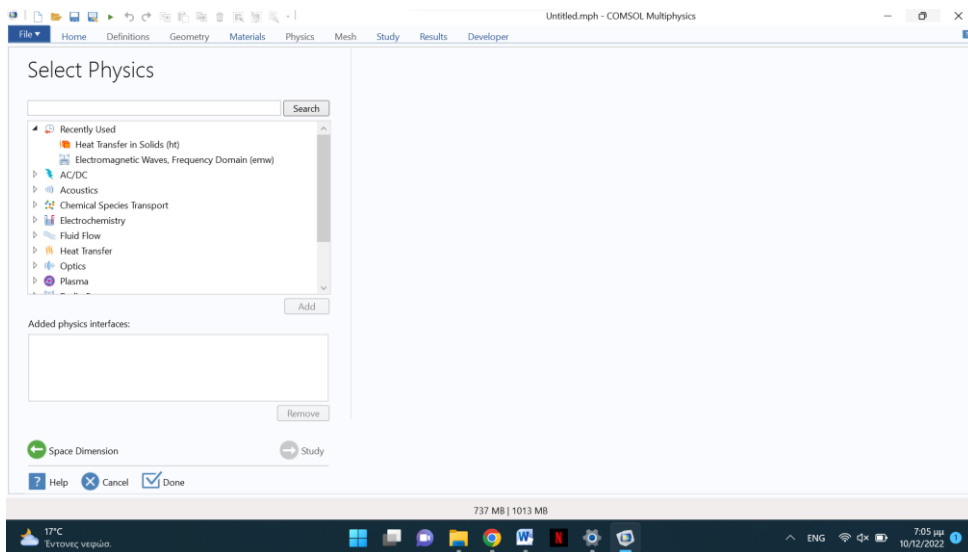
Για τη δημιουργία μιας γεωμετρίας στο πρόγραμμα comsol ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

- 1) Ανοίγοντας την εφαρμογή, αρχικά επιλέγεται ο τύπος της γεωμετρίας που πρόκειται να σχεδιαστεί.



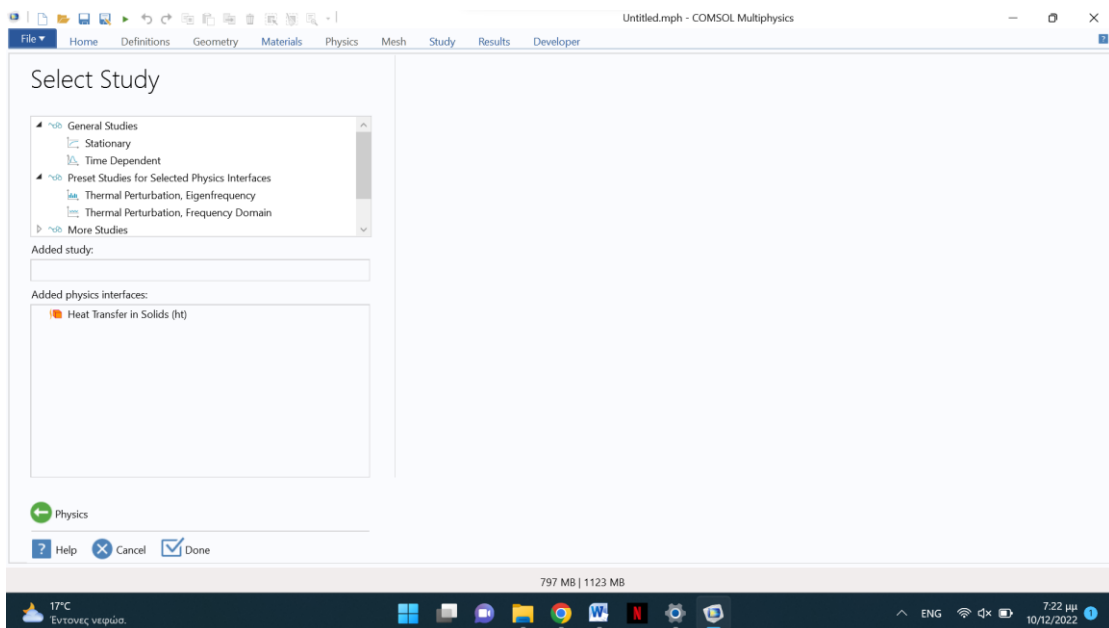
Σχήμα 2.1: Επιλογή επίπεδου σχεδίασης

- 2) Στη συνέχεια, με το υπό μελέτη πρόβλημα επιλέγεται κατάλληλος φυσικός εξομοιωτής (module) για να εισαχθεί η επιθυμητή γεωμετρία. Ο φυσικός εξομοιωτής που επιλέχθηκε στο παρακάτω σχήμα 2 είναι για μελέτη μεταφοράς θερμότητας (Heat Transfer Solid).



Σχήμα 2.2 :Επιλογή εξομοιωτή

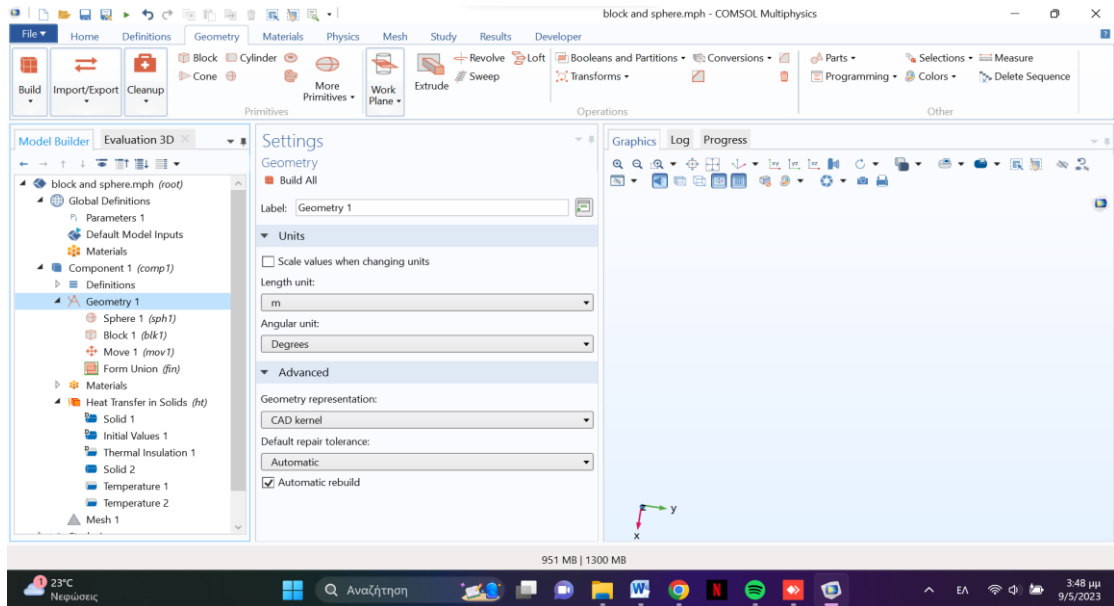
- 3) Επιλέγεται το είδος του προσομοίωσης (στατική/χρονομεταβαλλόμενη) για να μελετηθεί το πρόβλημα.



Σχήμα 2.3: Επιλογή λύτη

- 4) Για να δημιουργηθεί μια γεωμετρία θα πρέπει να δηλωθούν το επιθυμητό σχήμα, το μέγεθος και η μονάδα μέτρησης, μέσω της επιλογής «geometry». Η επιλογή «geometry» μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μοντελοποίηση

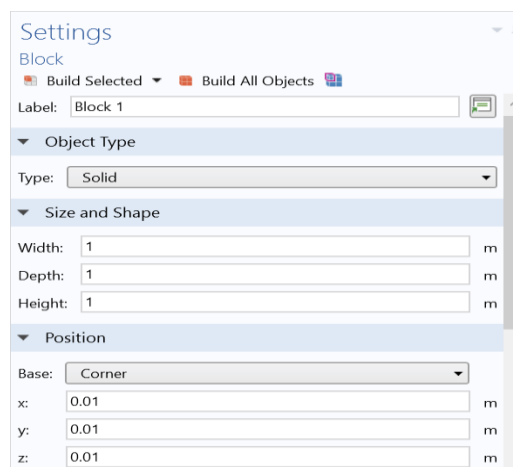
βασικών σχημάτων. όπως αυτά που απεικονίζονται παρακάτω αλλά και για τη δημιουργία πιο περίπλοκων γεωμετριών.



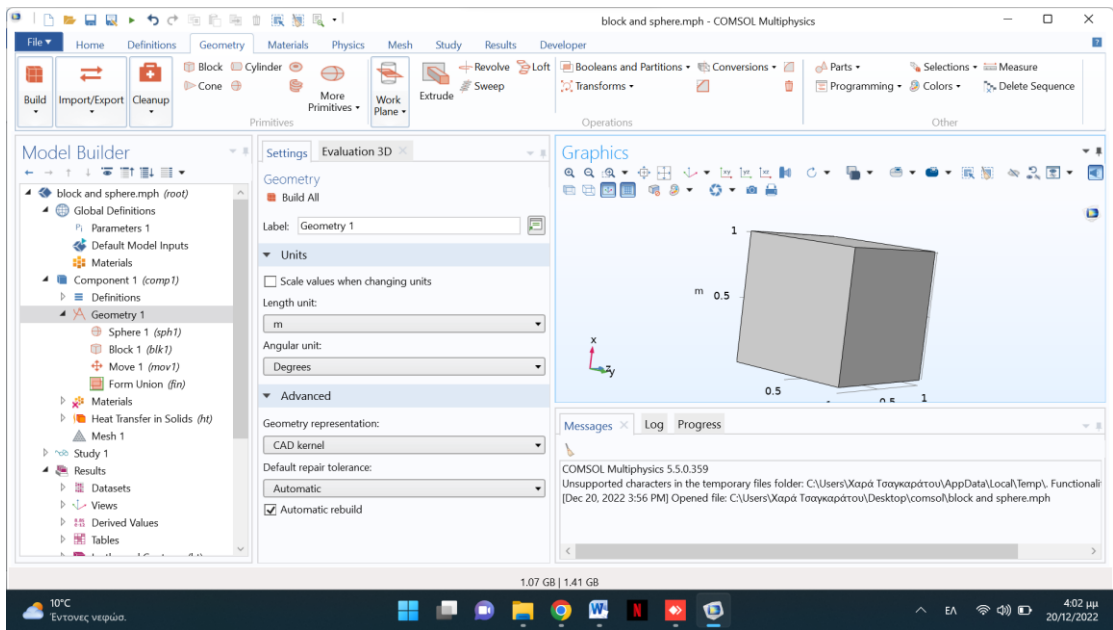
Σχήμα 2.4: Χώρος σχεδίασης γεωμετρίας

5) Παρακάτω παρουσιάζεται ένα παράδειγμα δημιουργίας γεωμετρίας για αγωγή θερμότητας σε ετερογενές υλικό, το οποίο αποτελείται από μια μήτρα κυβικού σχήματος και μία σφαίρα στο κέντρο της. Η γεωμετρία συνεπώς θα περιλαμβάνει ως χωρίο τον κύβο (domain) που εμπεριέχει την σφαίρα.

- i. Στον εξομοιωτή του Comsol η δημιουργία του κυβικού χωρίου γίνεται με την επιλογή του τύπου σχήματος «block» από τη λίστα του «geometry» που προαναφέρθηκε που και να μπου οι διαστάσεις.

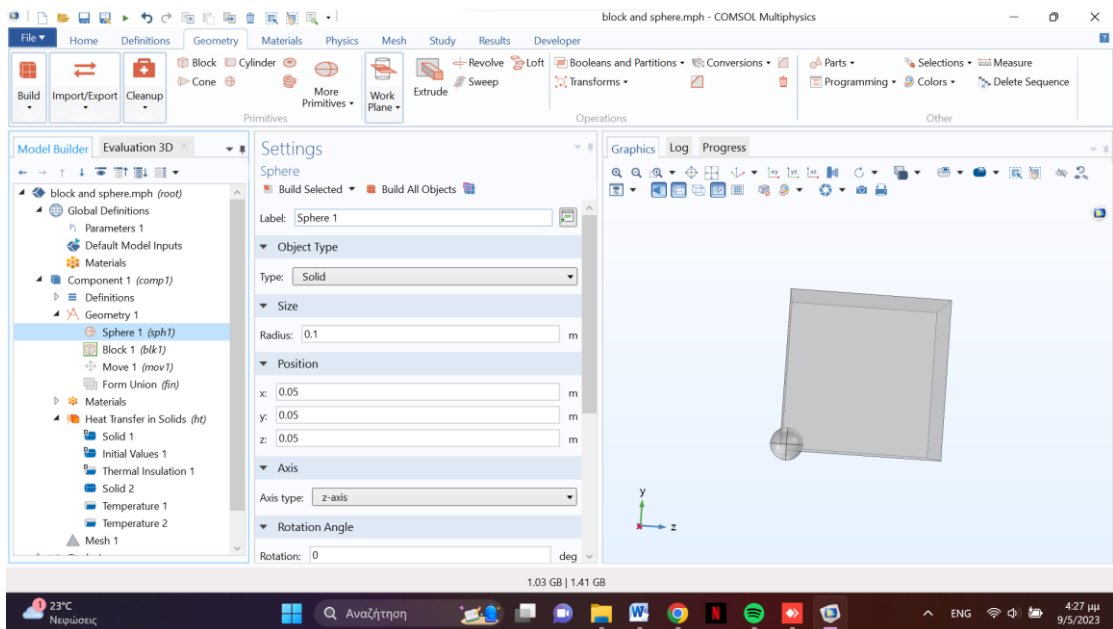


Σχήμα 2.5: Καθορισμός διαστάσεων στο χωρίο (block)



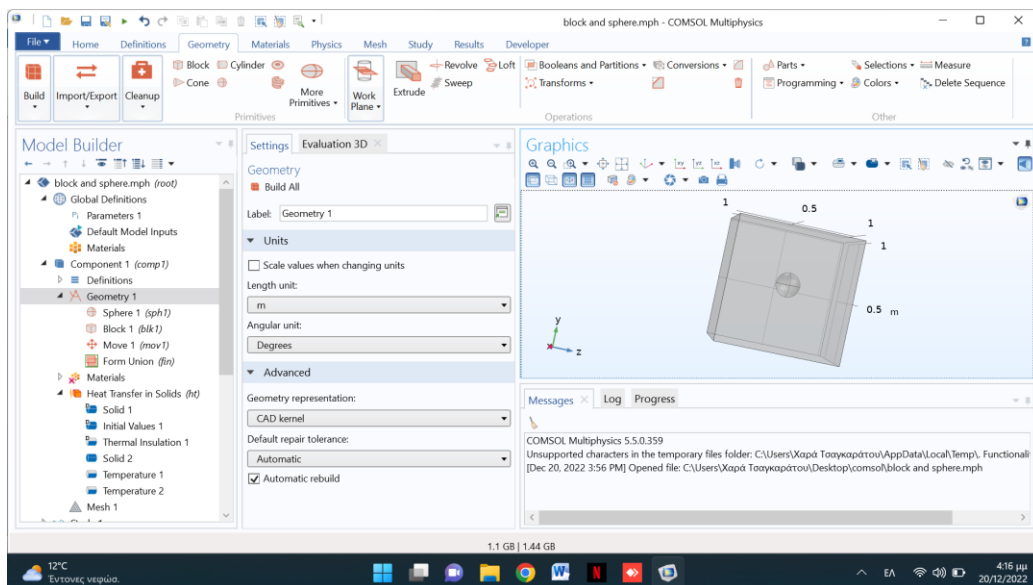
Σχήμα 2.6: Κυβικό χωρίο

- ii. Στη συνέχεια έχοντας δημιουργήσει το κυβικό χωρίο κάνουμε το ίδιο και για την σφαίρα, με την επιλογή του τύπου σχήματος «sphere» από τη λίστα του «geometry».

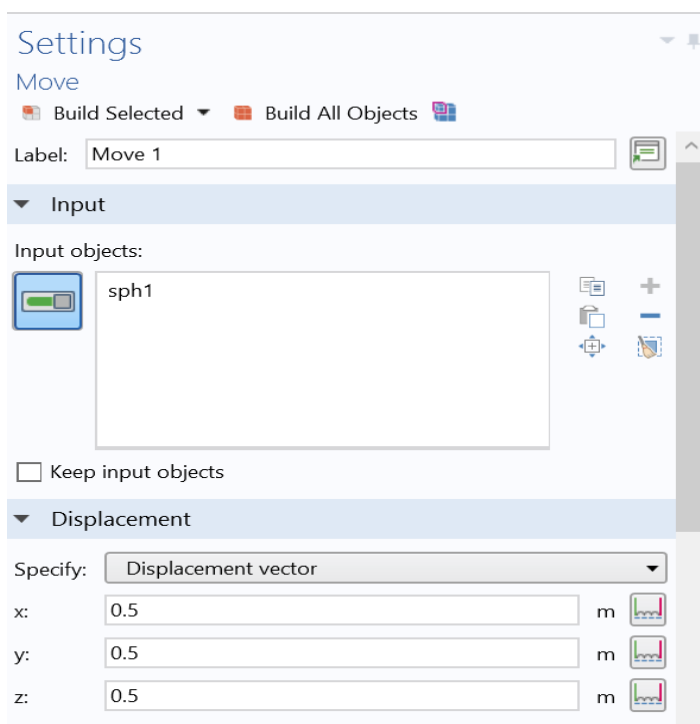


Σχήμα 2.7: Δημιουργία σφαίρας με συγκεκριμένες διαστάσεις

- iii. Χρησιμοποιώντας την επιλογή «move» τοποθετείται η σφαίρα μέσα στον κύβο, ορίζοντας συγκεκριμένες συντεταγμένες για το που θα τοποθετηθεί.



Σχήμα 2.8: Κύβος με σφαίρα στο κέντρο του

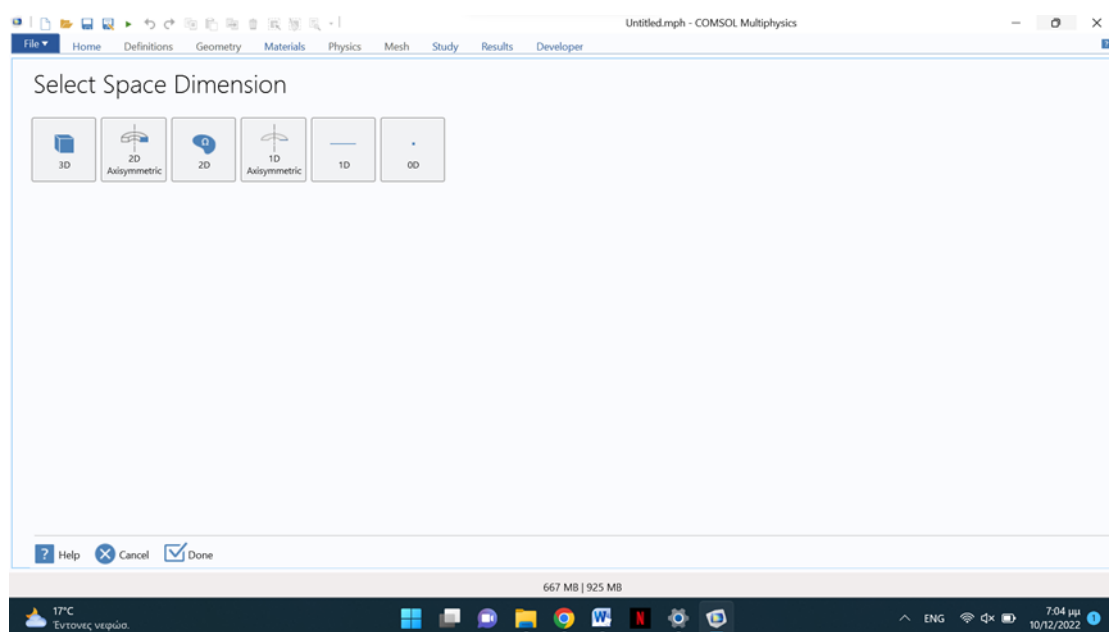


Σχήμα 2.9: Συντεταγμένες που ορίστηκαν για την μετακίνηση της σφαίρας μέσα στον κύβο

2.2 Περιγραφή της υπό μελέτη γεωμετρίας της παρούσας εργασίας

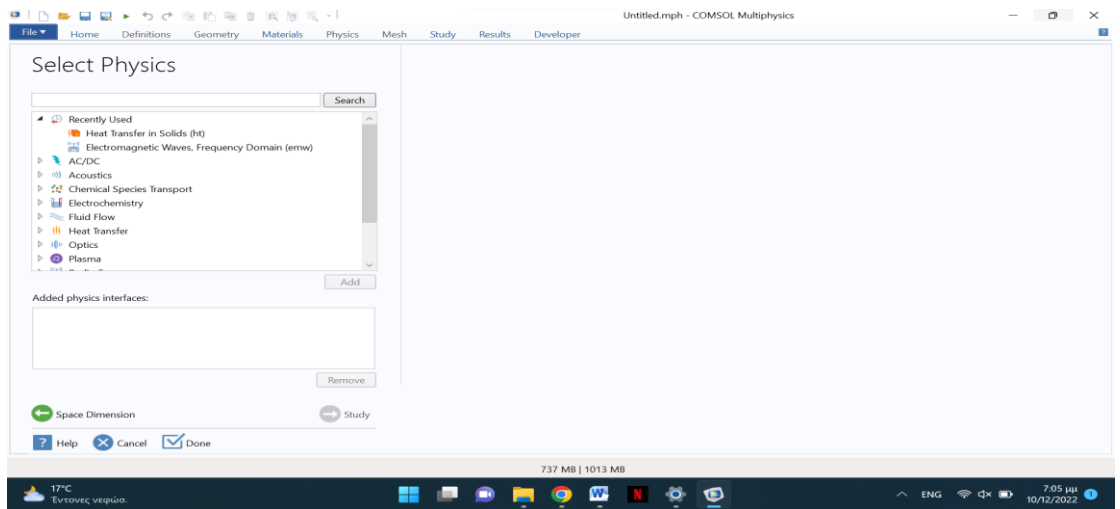
Για τη δημιουργία της γεωμετρίας της παρούσας μελέτης θα πρέπει να ακολουθηθούν τα παρακάτω βήματα του προγράμματος comsol.

- Εκκινώντας το πρόγραμμα comsol αρχικά επιλέγονται οι διατάξεις του υπό μελέτη προβλήματος, στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι οι 3 διαστάσεις, δηλαδή η επιλογή 3D για να φτιαχτεί ενεργοποιηθεί το κατάλληλο πρότυπο (model).



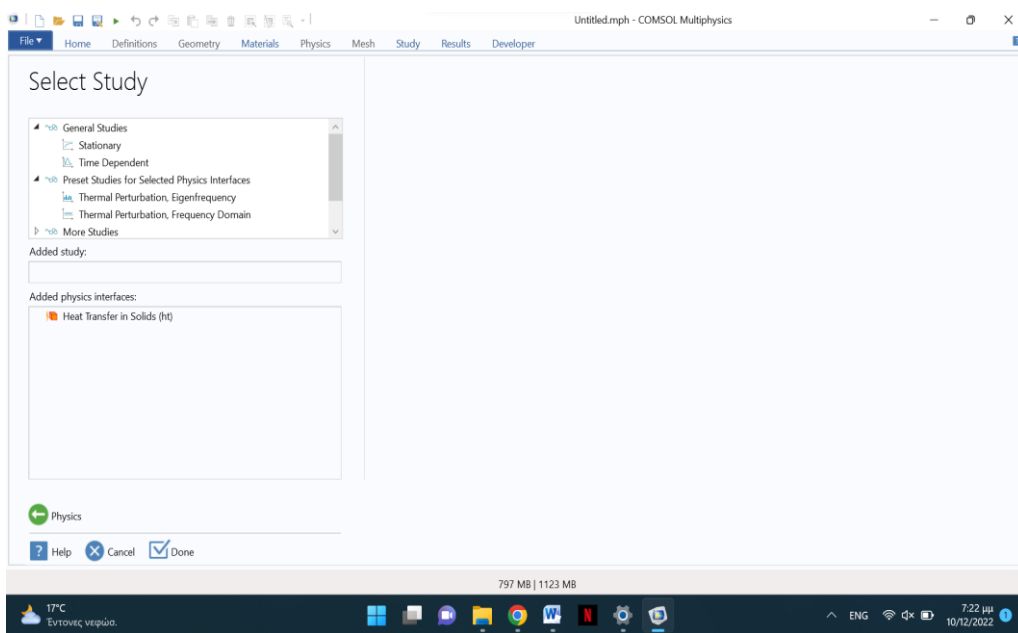
Σχήμα 2.10: Επιλογή επιπέδου σχεδίασης

- Επιλέγεται ο ειδικός εξομοιωτής που περιγράφει το πρόβλημα της αγωγής θερμότητας στο ετερογενές υλικό («Heat Transfer in Solids»)



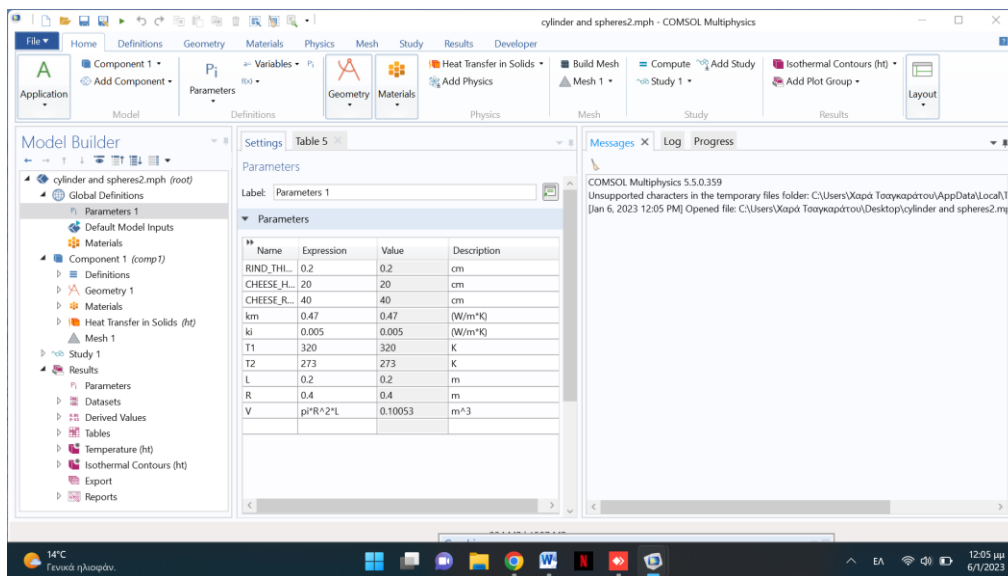
Σχήμα 2.11: Φυσικές ιδιότητες μετάδοσης θερμότητας

- Επιλέγεται Στατικός Λύτης («Study: Stationary»)



Σχήμα 2.12 : Επιλογή λύτη

- Δηλώνονται στην επιλογή «Parameters» οι παράμετροι του προβλήματος, όπως γεωμετρικά χαρακτηριστικά, συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας, θερμοκρασίες κ.α.



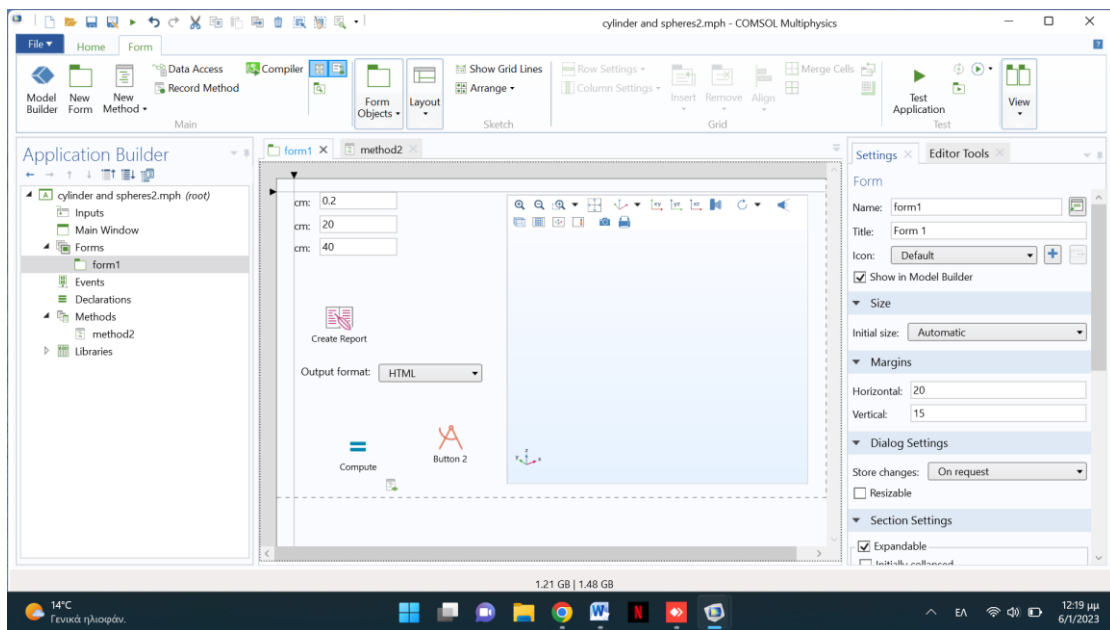
Σχήμα 2.13: Παράμετροι που θα χρησιμοποιηθούν

- Στην συνέχεια θα πρέπει να εισάγουμε σφαίρες το ετερογενούς-μονωτικού υλικού στην επιλεγμένη μήτρα. Επειδή ο αριθμός των σφαιρών είναι πολύ μεγάλος, δεν είναι εφικτή η εισαγωγή με τον τρόπο που υπεδείχθη προηγούμενος διότι αυτό θα απαιτούσε άπειρο πρακτικά χρόνο. Άρα χρειάστηκε να δημιουργηθεί λογισμικό που να εισάγει σε τυχαία θέση μέσα σε επιλεγμένη γεωμετρία, σφαίρες με τυχαία ακτίνα σε ένα προκαθορισμένο εύρος ακτινών. Ο κώδικας προβλέπει επικάλυψη μεταξύ σφαιρών με σκοπό να μοντελοποιηθεί όσο το δυνατό πιο πιστά η ανάμειξη υδρογέλης-τσιμεντοκονιάματος που παρουσιάστηκε στο 1^ο Κεφάλαιο. Το σχήμα της μήτρας που επιλέχθηκε είναι κυλινδρικό ακτίνας R και ύψους $L \ll R$. Δηλαδή πρόκειται για κυλινδρική πλάκα, στην οποία θα αλλάξει η κατ όγκο σύσταση της μήτρας και του μονωτικού υλικού

Στον εξομοιωτή αυτό επιτυγχάνεται από την καρτέλα «Application Builder» και συγκεκριμένα επιλέγοντας:

Application Builder → New Form

 - Ενεργοποιείται νέα καρτέλα η Form 1 με τις υποκαρτέλες → Inputs/ outputs, Graphics και Buttons, όπου στην τελευταία επιλέγεται το «compute study».



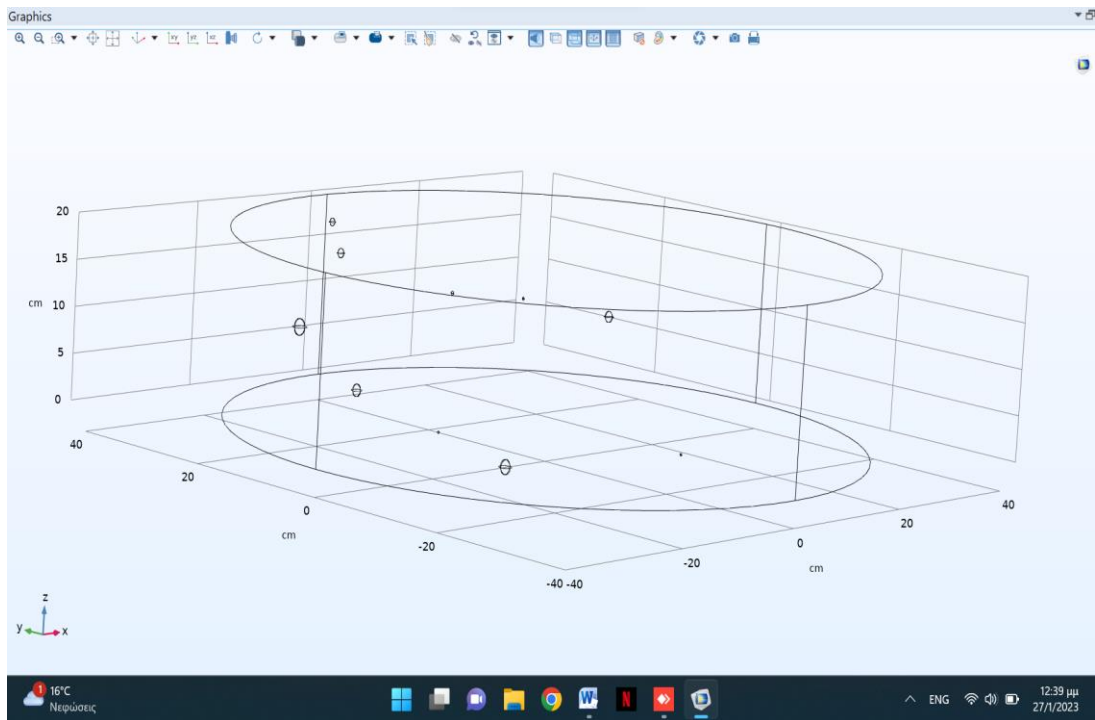
Σχήμα 2.14: Πλατφόρμα δημιουργίας δεδομένων

- Έπειτα με τις ακόλουθες επιλογές μπορεί να εισαχθεί ο κώδικας που υλοποιήθηκε για την δημιουργία του ετερογενούς υλικού, όπως προαναφέρθηκε:
- Form objects → Button → Settings Button → Geometry 1 (plot) Edit Argument → form 1 → graphics 1
- Editor Tools Report 1 → output Format → Input
- Compute Setting → Libraries → Sounds → Run
- Convert new method
- Method:

Στην τελευταία επιλογή/καρτέλα αντιγράφεται ο κώδικας που δημιουργήθηκε ώστε να κατασκευαστεί το υπό προσομοίωση υλικό. Στον κώδικα επιλέγεται το μέγεθος της μήτρας, το πλήθος των σφαιρών που επιθυμείται να δημιουργήσει, το εύρος διαμέτρου που επιθυμείται να έχουν οι σφαίρες, το $r_{ind_thickness}$ που είναι η απόσταση που πρέπει να έχουν οι σφαίρες για να μη βγαίνουν έξω από τη μήτρα, τη μονάδα μέτρησης. Τέλος η δομή αντιμετωπίζεται από τον εξομοιωτή ως ενιαία με την εντολή «Union».

Κώδικας δημιουργίας σφαιρών

```
int NUMBER_OF_HOLES = 10;
int ind = 0;
double hx, hy, hz, hr = 0.0;
double HEIGHT = 20;
double RADIUS = 40;
double RIND_THICKNESS = 0.2;
double HOLE_MIN_RADIUS = 0.1;
double HOLE_MAX_RADIUS = 1;
model.component("comp1").geom("geom1").lengthUnit("cm");
model.component("comp1").geom("geom1").selection().create("csel1", "CumulativeSelection");
while (ind < NUMBER_OF_HOLES) {
  hx = (2.0*Math.random()-1.0)*RADIUS;
  hy = (2.0*Math.random()-1.0)*RADIUS;
  hz = Math.random()*HEIGHT;
  hr = Math.random()*(HOLE_MAX_RADIUS-HOLE_MIN_RADIUS)+HOLE_MIN_RADIUS;
  if ((Math.sqrt(hx*hx+hy*hy)+hr) > RADIUS-RIND_THICKNESS) {continue; }
  if (((hz-hr) < RIND_THICKNESS) || ((hz+hr) > HEIGHT-RIND_THICKNESS)) {continue; }
  model.component("comp1").geom("geom1").create("sph"+ind, "Sphere");
  model.component("comp1").geom("geom1").feature("sph"+ind).set("r", hr);
  model.component("comp1").geom("geom1").feature("sph"+ind).set("pos", new double[]{hx, hy, hz});
  model.component("comp1").geom("geom1").feature("sph"+ind).set("contributeto", "csel1");
  ind++;}
model.component("comp1").geom("geom1").create("cyl2", "Cylinder");
model.component("comp1").geom("geom1").feature("cyl2").set("r", RADIUS);
model.component("comp1").geom("geom1").feature("cyl2").set("h", HEIGHT);
model.component("comp1").geom("geom1").create("un1", "Union");
model.component("comp1").geom("geom1").feature("un1").selection("input").set("cyl2");
model.component("comp1").geom("geom1").feature("un1").selection("input2").named("csel1");
model.component("comp1").geom("geom1").run();
```



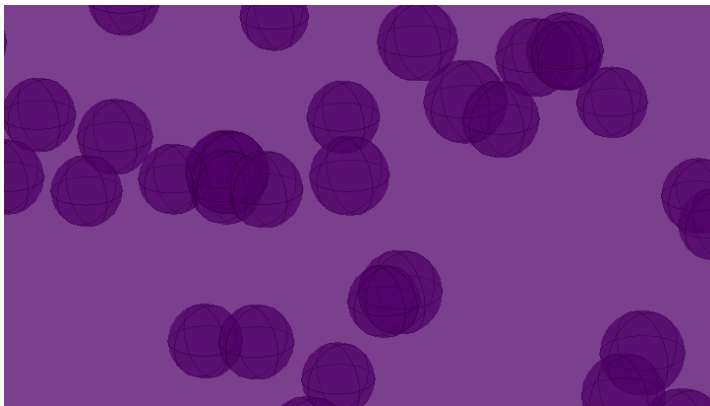
Σχήμα 2.15: Αποτέλεσμα γεωμετρίας της μεθόδου

2.3 Δομές με διαφορετικό πλήθος σφαιρών

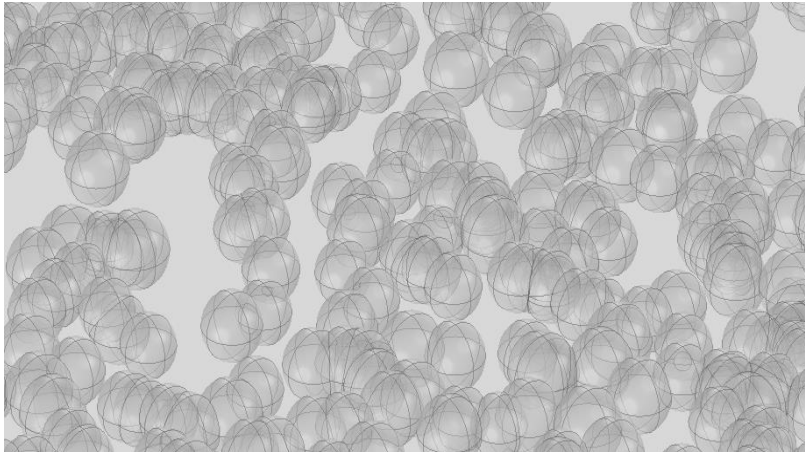
1^η Δοκιμαστική Προσομοίωση 10 σφαιρών



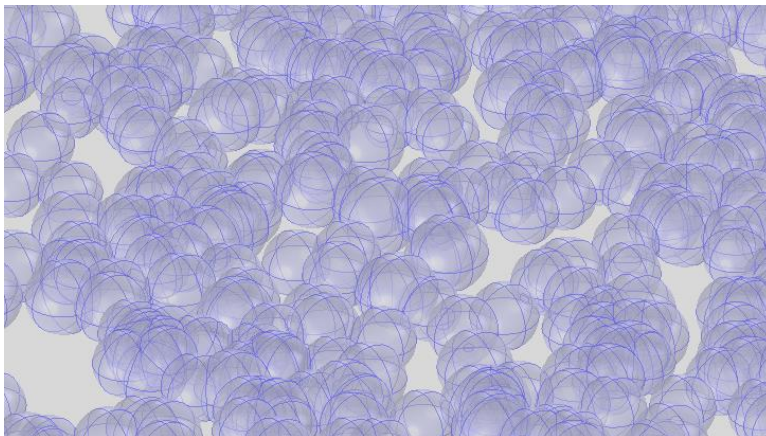
Σχήμα 2.16: Δομή 10 σφαιρών



Σχήμα 2.17: Δομή 100 σφαιρών



Σχήμα 2.18: Δομή 500 σφαιρών



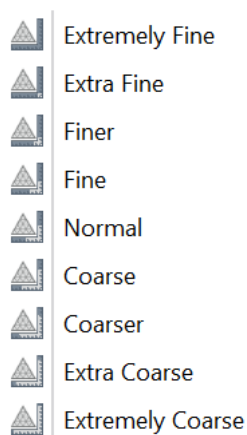
Σχήμα 2.19: Δομή των 800 σφαιρών

Παρατηρούμε ότι καθώς μεγαλώνει ο αριθμός των σφαιρών η πυκνότητα μεταξύ των σφαιρών αυξάνεται και φαίνονται ως ένα υλικό όπως είναι το επιθυμητό αποτέλεσμα.

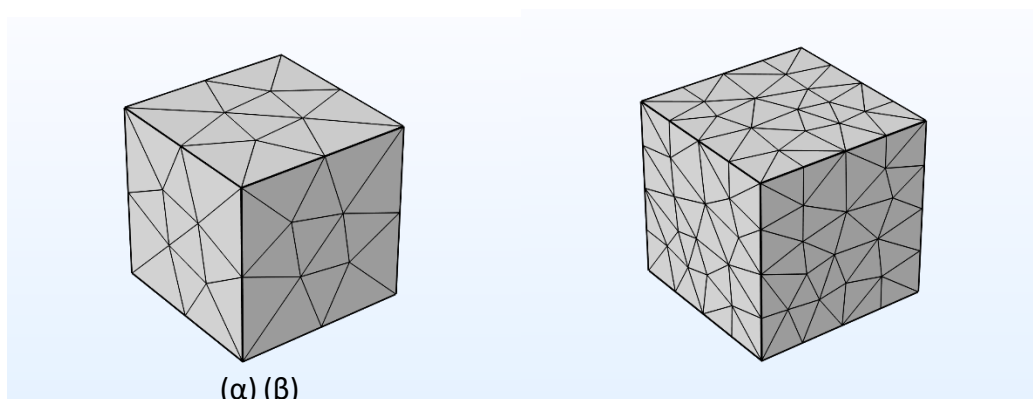
2.4 Διακριτοποίηση-Meshing

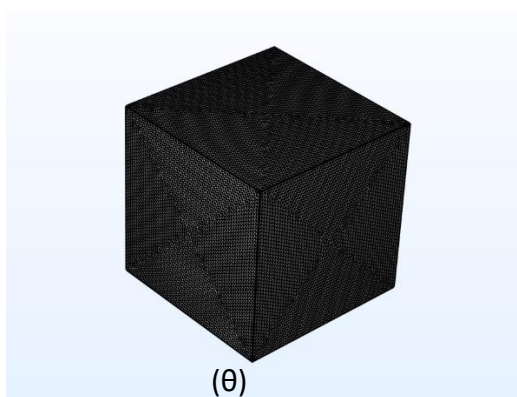
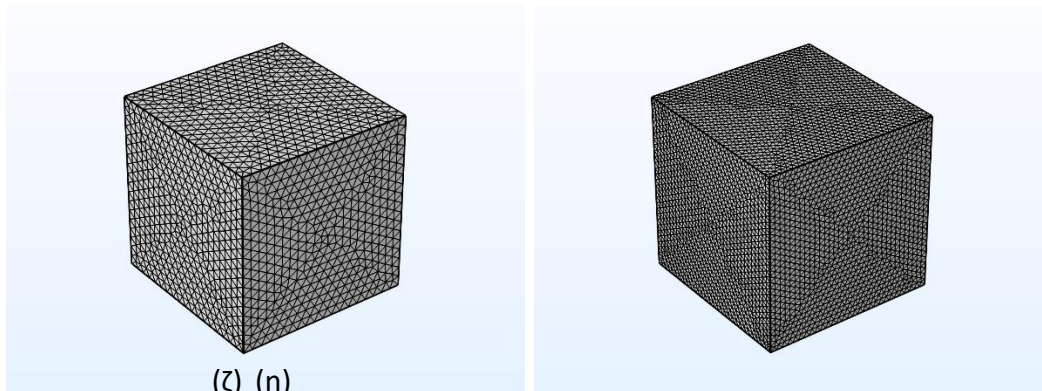
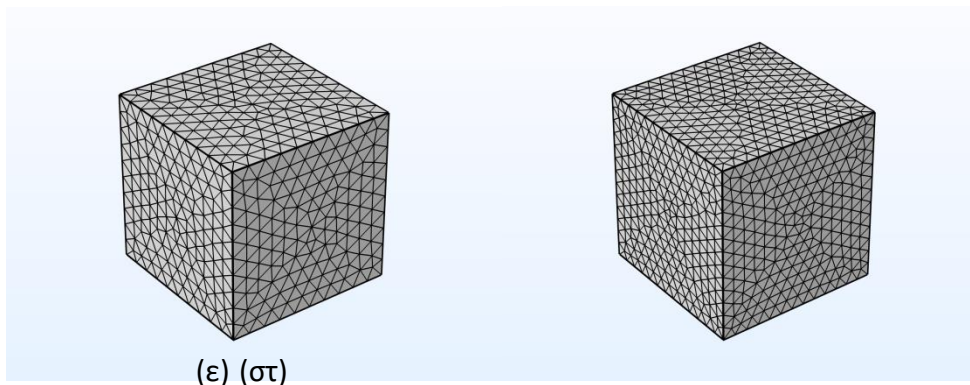
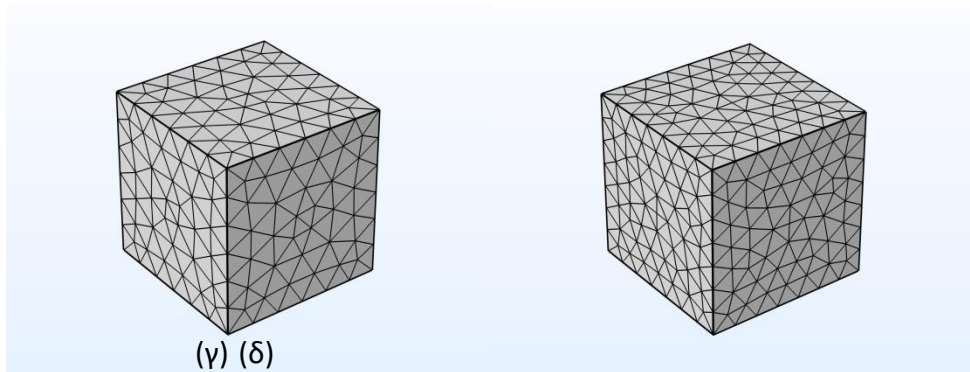
Η διακριτοποίηση απαιτείται για την αριθμητική επίλυση διαφόρων θεωρητικών προβλημάτων μέσω των προσομοιώσεων, η οποία χρησιμοποιεί mesh ή αλλιώς πλέγματα. Το μέγεθος και το σχήμα του πλέγματος επιλέγεται ανάλογα με τις απαιτήσεις κάθε μελέτης, και ανάλογα με την απαιτούμενη ακρίβεια των αποτελεσμάτων και ταχύτητα σύγκλισης.

Το πρόγραμμα Comsol παρέχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν διαφορετικής ακρίβειας πλέγματα από πολύ αδρά έως πολύ λεπτομερή, όπως φαίνεται και στις ακόλουθες κλίμακες:



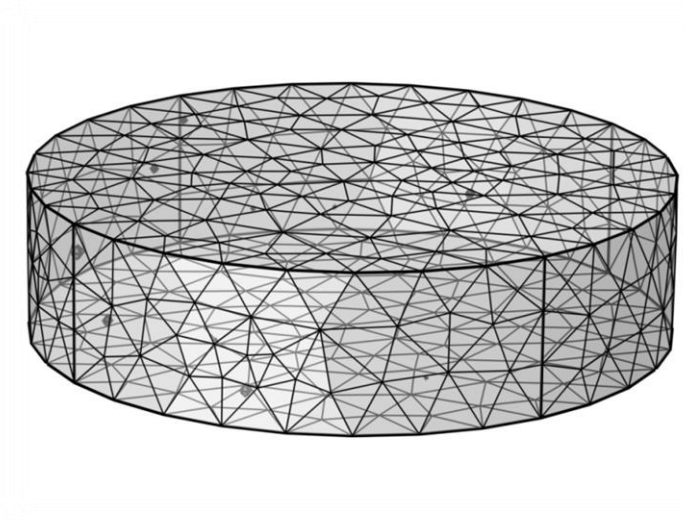
Παρακάτω φαίνεται ένα παράδειγμα απλής γεωμετρίας σε διάφορα μεγέθη πλέγματος



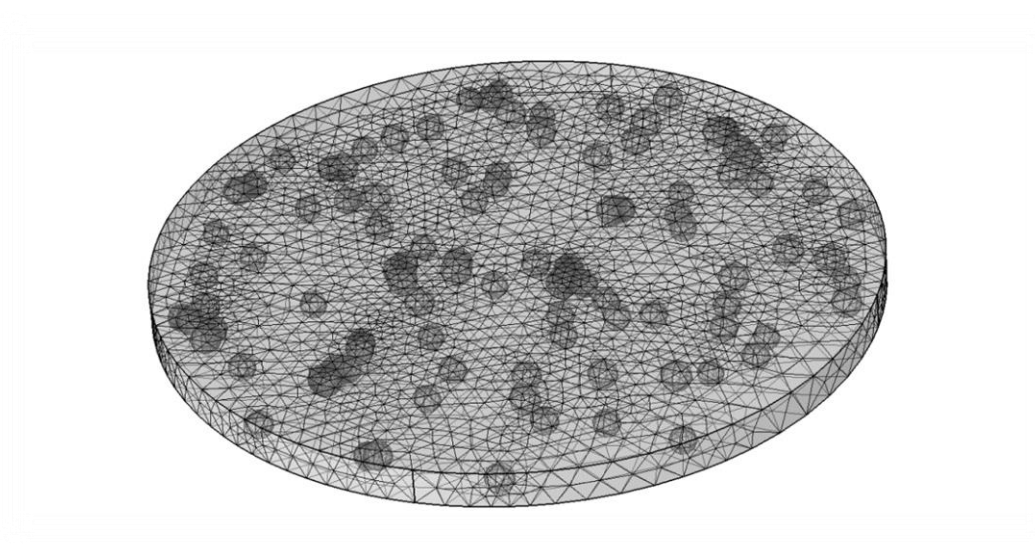


Σχήμα 2.20: Διακριτοποίηση πλέγματος (α) Extremely coarse (β)Extra Coarse, (γ) Coarser, (δ) Coarse, (ε)Normal, (στ) Fine, (ζ) Finer, (η) Extra Fine, (θ) Extremely Fine

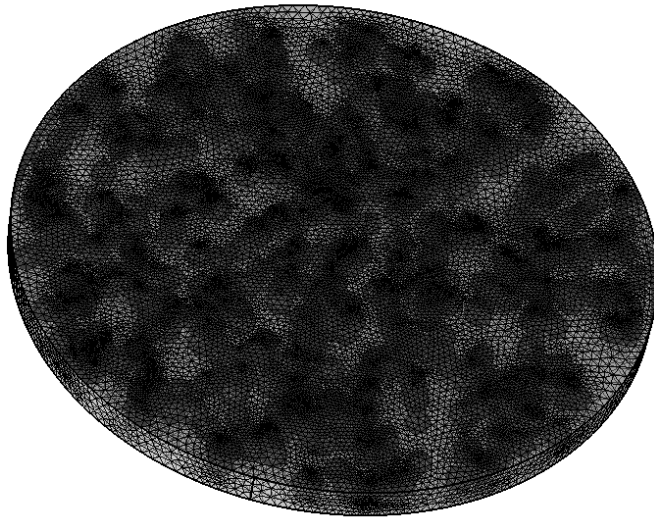
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα πλέγματα των προσομοιώσεων της παρούσας εργασίας.



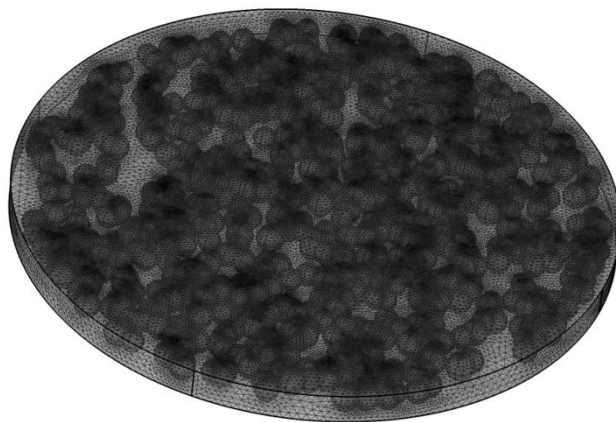
Σχήμα 2.21 : Mesh Προσομοίωσης 10 σφαιρών (Size Element:Normal)



Σχήμα 2.22 : Mesh 7.3 % πορώδους (Size Element: Normal)

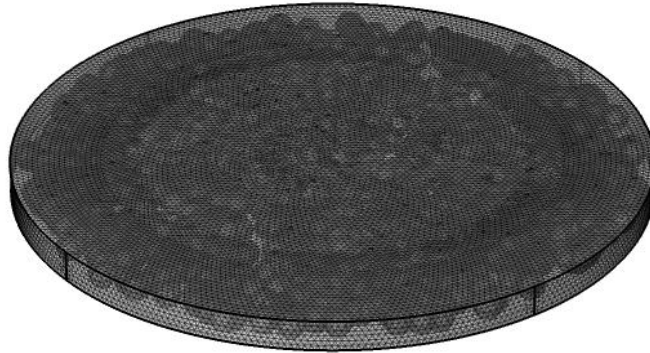


Σχήμα 2.23 : Mesh 30% πορώδους (Size Element: Extra fine)



Σχήμα 2.24 : Mesh 41.1% Πορώδους (Size Element: Extremely Fine)

Αξίζει να αναφερθεί ότι για να πραγματοποιηθεί η διακριτοποίηση της προσομοίωσης των 800 σφαιρών χρειάστηκε να διορθωθούν 2 domains επειδή διαπιστώθηκε δυσκολία επίλυσης του προβλήματος που υπήρχε.



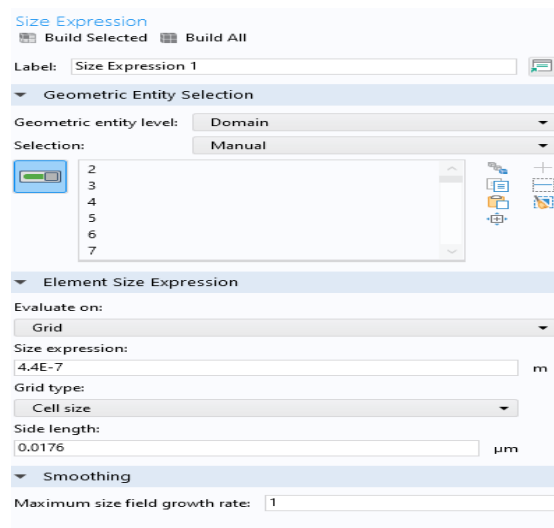
Σχήμα 2.25: Mesh 51% Πορώδους (Size Domain 1 : Cylinder Fine, Size Domain 2Q Spheres Manual)

Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται οι ιδιότητες που έχει το πλέγμα των σφαιρών για την προσπάθεια που έγινε να δημιουργηθεί mesh:

Size expression: έκφραση που ελέγχει το μέγεθος του πλέγματος,

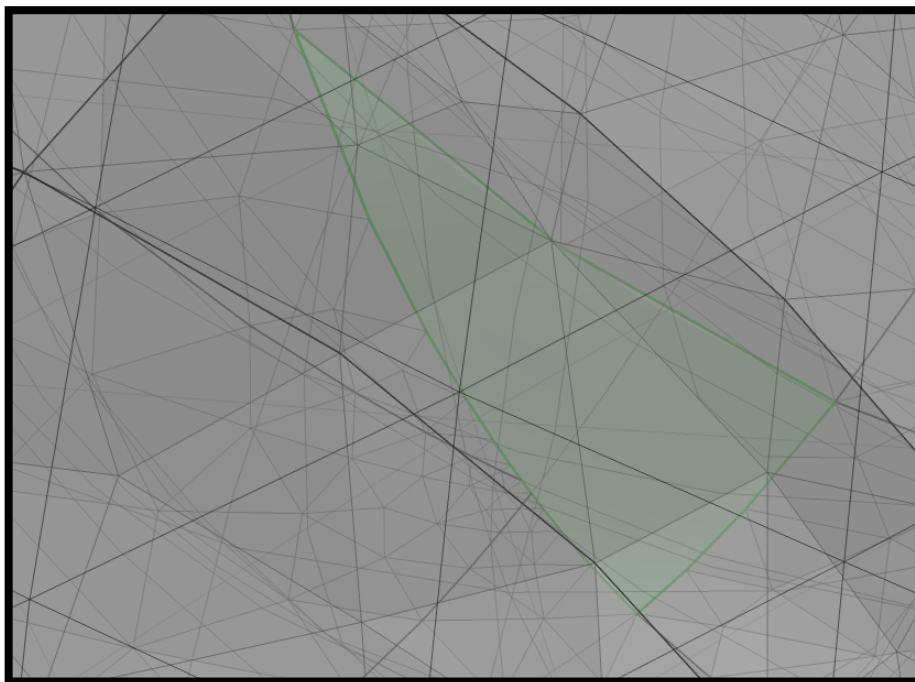
side length: μήκος πλέγματος και

smoothing: ρυθμίζει πόσο επίπεδο είναι το σχήμα του πλέγματος.



Σχήμα 2.26 : Καρτέλα χειρισμού του πλέγματος των σφαιρών

Κατά τη δημιουργία του mesh παρουσιάστηκε ένα σφάλμα στη μήτρα (κύλινδρο) και μια επιφάνεια του δεν μπορούσε να σχηματίσει πλέγμα για να ολοκληρωθεί η διακριτοποίηση. Το σφάλμα του πλέγματος που αντιμετωπίστηκε φαίνεται στην εικόνα:



Σχήμα 2.27 : Σφάλμα στο σύνορο: Μια μικρή επιφάνεια

Μετά από ποικίλες προσπάθειες καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι δεν φταίει το μέγεθος του πλέγματος, διότι προηγήθηκαν προσομοιώσεις από μεγάλο size έως και πολύ μικρό και δεν διορθώθηκε το πρόβλημα. Επίσης, το συγκεκριμένο πρόγραμμα comsol δε δίνει τη δυνατότητα αλλαγής μιας περιοχής μόνο με τοπική επεξεργασία. Ένα πρόγραμμα με καλύτερες δυνατότητες και ευελιξία στην δημιουργία πλέγματος (meshing) πιστεύεται ότι θα έλυne το πρόβλημα.

Εσκεμμένα κενή σελίδα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Προσομοίωση Μετάδοσης Θερμότητας

Σε αυτό το κεφάλαιο θα μελετηθεί η μοντελοποίηση της γεωμετρίας σε διάφορες προσομοιώσεις που έγιναν και πως επηρεάζεται σε ορισμένα όρια θερμοκρασιών.

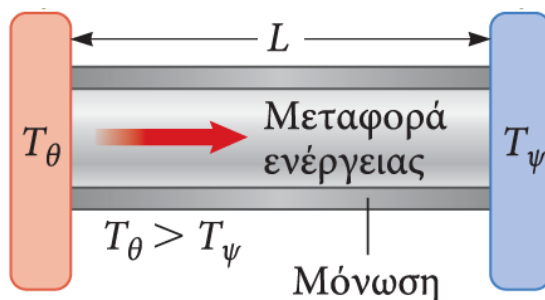
3.1 Μετάδοση Θερμότητας σε στερεά υλικά

Η μεταφορά θερμότητας σε στερεά υλικά όπως και το υπό μελέτη ετερογενές υλικό της παρούσας εργασίας γίνεται με τη μέθοδο της αγωγής. Ως αγωγή ορίζεται η μετάδοση ενέργειας από ένα σωματίδιο με μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας σε ένα άλλο με μικρότερο ποσοστό ενέργειας λόγω της μεταξύ τους αλληλεπίδρασης, χωρίς να παρατηρείται μετακίνηση της μάζας του υλικού. Η αγωγή μπορεί να λάβει χώρα ακόμη και στα υγρά και αέρια υλικά η οποία οφείλεται εξαιτίας των συγκρούσεων μεταξύ των μορίων κατά τις τυχαίες κινήσεις τους, ενώ στα στερεά υλικά οφείλεται λόγω των ταλαντώσεων που παρουσιάζουν τα μόρια μέσα στο πλέγμα. Απαραίτητη προϋπόθεση της αγωγής είναι τα υλικά να είναι ακίνητα.

Μέσα από πειραματικές δοκιμές αποδείχτηκε ότι ο ρυθμός αγωγής θερμότητας εξαρτάται από τη γεωμετρία του μέσου, το πάχος, το υλικό και τη διαφορά θερμοκρασίας στις πλευρές του μέσου.

Τα παραπάνω συμπεράσματα είναι βασισμένα σε έρευνα που έκανε ο Fourier ο οποίος διατύπωσε την παρακάτω μαθηματική σχέση για τον υπολογισμό μετάδοσης θερμότητας μέσω αγωγής:

$$q = -k \cdot A s \cdot \frac{dT}{dx} [W] \quad (3.)$$



Σχήμα 3.1: Παράδειγμα αγωγής θερμότητας σε ράβδο [14]

Ο παραπάνω τύπος υπολογίζει την ροή θερμότητας όταν είναι γνωστή η χωρική κλίση της θερμοκρασίας ή θερμοβαθμίδα ($\frac{dT}{dx}$) σε συγκεκριμένη θετική κατεύθυνση x και γνωρίζουμε τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των επιφανειών. A_s είναι η κάθετη επιφάνεια και k ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού που αποτελεί το μέτρο της ικανότητας ενός υλικού να άγει την θερμότητα.

Η μετάδοση θερμότητας αποτελεί ένα διανυσματικό μέγεθος αφού έχει φορά, διεύθυνση και μέτρο. Κατά συνέπεια για τον υπολογισμό της σε ένα ορισμένο σημείο να καλείται απαραίτητη η γνώση της κατεύθυνσης του. Συχνά αντιμετωπίζονται προβλήματα μετάδοσης θερμότητας διαφόρων εφαρμογών (τεχνολογικών ή πρακτικών) τα οποία για να επιλυθούν χρειάζεται να προσδιοριστεί η θερμοκρασιακή μεταφορά των υλικών που την επηρεάζουν σε συγκεκριμένη θέση και χρόνο, δηλαδή να υπολογιστεί το θερμοκρασιακό πεδίο. Το θερμοκρασιακό πεδίο είναι δυνατόν να υπολογιστεί με:

- Αναλυτικές μαθηματικές μεθόδους, δηλαδή με την άμεση επίλυση των διαφορικών εξισώσεων, με τη χρήση κατάλληλων οριακών συνθηκών, όπου αυτό είναι εφικτό.
- Πειραματικές μεθόδους, με βάση τα πειραματικά δεδομένα για την παροχή πληροφοριών που δεν μπορούν να παρθούν μέσω θεωρητικών υπολογισμών των άλλων μεθόδων.
- Αριθμητικές μεθόδους βασισμένες σε πεπερασμένους όγκους ή στοιχεία με την χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών, που χρησιμοποιείται ευρέως σήμερα.

Στην παρούσα εργασία ο εξομοιωτής βασίζεται στην μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

3.2 Προσδιορισμός θερμοκρασίας σε ένα σημείο του μέσου

Για να οριστεί η θερμοκρασία σε ένα ορισμένο σημείο απαιτείται ο προσδιορισμός των συντεταγμένων της γεωμετρίας που πρόκειται να μελετηθεί. Ανάλογα με την γεωμετρία που μελετάται ορίζεται το κατάλληλο σύστημα συντεταγμένων το οποίο είναι τριών διαστάσεων. Άρα ο προσδιορισμός της θερμοκρασίας ενός μεγέθους αποτελεί τρισδιάστατο πρόβλημα. Όμως η ροή θερμότητας πολλές φορές μεταβάλλεται ως προς μία κατεύθυνση και στις άλλες κατευθύνσεις θεωρείται μηδενική ή αμελητέα ανάλογα με το επίπεδο ακρίβειας κάθε προβλήματος που αντιμετωπίζεται (σχήμα 3.1). Η ροή μπορεί να είναι μόνιμη

(σταθεράς κατάστασης), μεταβατική (μη σταθεράς κατάστασης) και εντοπισμένης χωρητικότητας (ομοιόμορφη μεταβολή θερμοκρασίας).

Μόνιμη ροή έχουμε όταν η θερμοκρασία και η ροή θερμότητας μένουν σταθερές σε κάθε θέση του μέσου. Μεταβατική κατάσταση ορίζεται η ροή που η μετάδοση θερμότητας εξαρτάται από το χρόνο.

Τέλος, τα συστήματα εντοπισμένης χωρητικότητας έχουν μεταβατική ροή η οποία αλλάζει με το χρόνο αλλά όχι με την θέση και η θερμοκρασία του μέσου μεταβάλλεται ομοιόμορφα.

3.3 Μονοδιάστατη αγωγή και οριακές συνθήκες

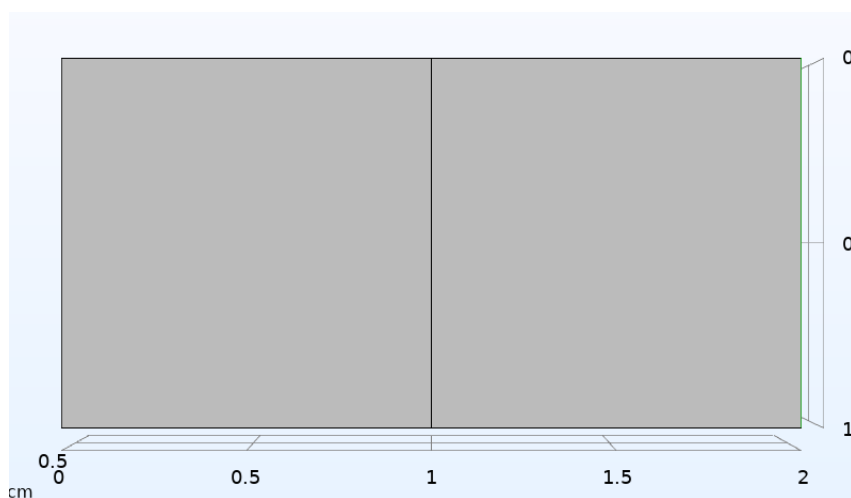
Μονοδιάστατη αγωγή έχουμε όταν η ροή θερμότητας μπορεί να οριστεί μόνο σε μία κατεύθυνση. ενώ στις άλλες δύο κατευθύνσεις μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα (σχήμα 3.1).

Οριακές συνθήκες:

Μπορούν να δώσουν τιμές σε μεγέθη όπως η θερμοκρασία, η πυκνότητα και η ροή θερμότητας σε ορισμένες θέσεις σε έναν τρισδιάστατο χώρο.

- **Συνθήκη Dirichlet:** Αναφέρεται στις συνοριακές συνθήκες καθορισμένης θερμοκρασίας σε μια επιφάνεια.

Αν θεωρήσουμε ότι έχουμε έναν επίπεδο τοίχο πάχους $L = 2 \text{ cm}$

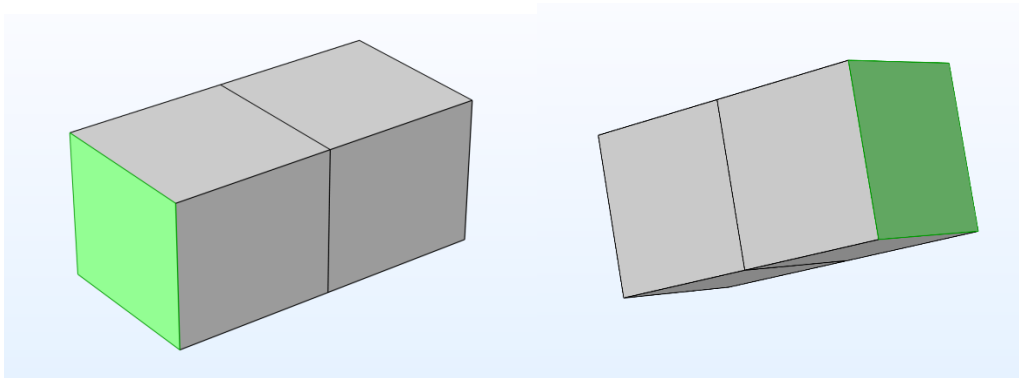


Σχήμα 3.2: Παράδειγμα τοίχου μήκους $L=2$ cm (εικόνα από Comsol)

Θα έχουμε συνοριακές συνθήκες καθορισμένης θερμοκρασίας

$$\theta(x=0,t) = \theta_1 \text{ και } \theta(x=2,t) = \theta_2.$$

Όπου θ_1 είναι η θερμοκρασία που έχει το σημείο $x=0$ και θ_2 η θερμοκρασία που έχουμε για $x=2$ cm.



Σχήμα 3.3: Συνοριακή Συνθήκη Dirichlet (εικόνα από Comsol)

- **Συνθήκη Neumann:** Αναφέρεται σε συνοριακές συνθήκες που μπορεί να καθοριστεί η ροή θερμότητας (μεταφορά θερμότητας ανά εμβαδό επιφάνειας, σε W/m^2). Η ροή θερμότητας μιας επιφάνειας μπορεί να εκφραστεί από τον νόμο του Fourier κατά την x διεύθυνση, σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$\dot{q} = -k \cdot \frac{dT}{dx} [W/m^2]. \quad (4.)$$

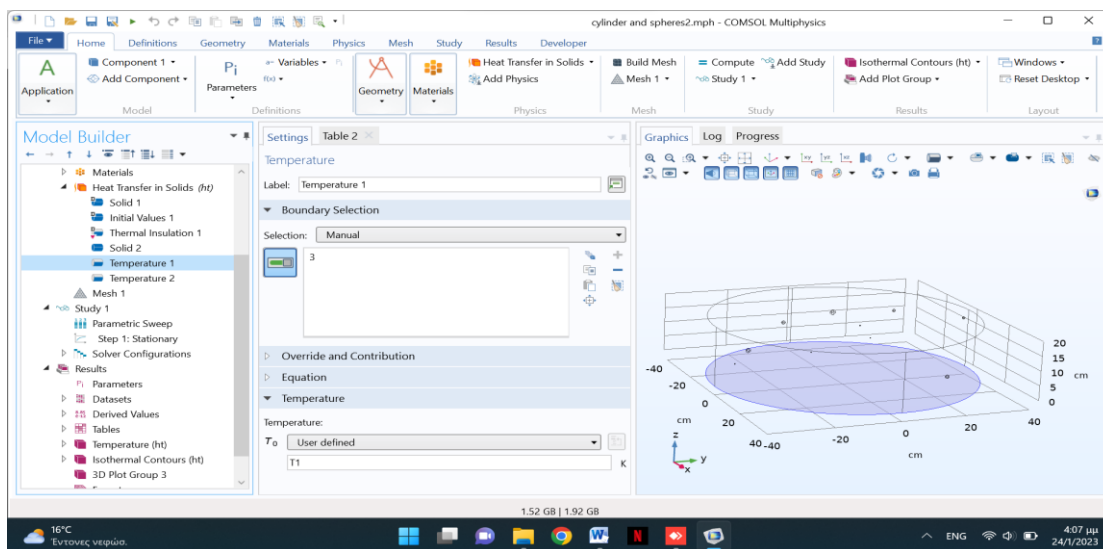
Όταν είναι γνωστή η θερμοκρασιακή βαθμίδα $\frac{dT}{dx}$ και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, k . Στην ειδική περίπτωση που το σύνορο είναι μονωμένο τότε η ροή θερμότητας σε αυτό μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα. Άρα, όταν έχουμε μόνωση η ροή θερμότητας θεωρείται $q=0$.

Οι παραπάνω συνοριακές συνθήκες χρησιμοποιήθηκαν και για τις παρακάτω προσομοιώσεις συνδυαστικά, η πρώτη για τον καθορισμό των θερμοκρασιών στις δύο πλευρές του κυλίνδρου και η δεύτερη για την παράπλευρη επιφάνεια όπου θεωρήθηκε μονωμένη.

3.4 Μεθοδολογία επίλυσης θερμικής αγωγής στον εξομοιωτή

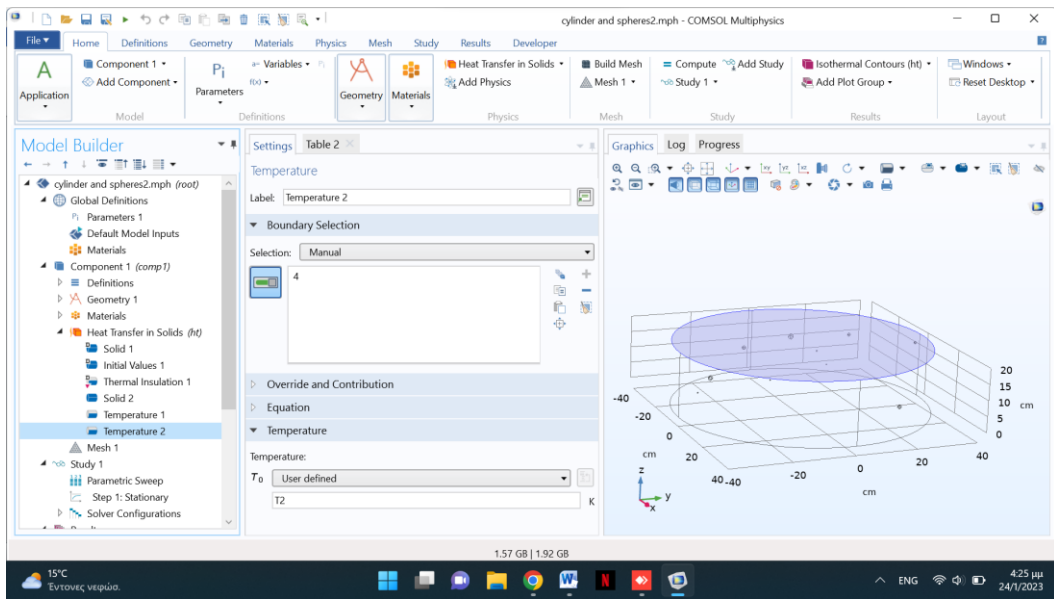
Δοκιμαστική προσομοίωση σε δομή 10 σφαιρών

Έχει οριστεί μια θερμοκρασία $T_1 = 320\text{K}$ στο κάτω όριο της γεωμετρίας η οποία έχει τεθεί ως μέγιστη.



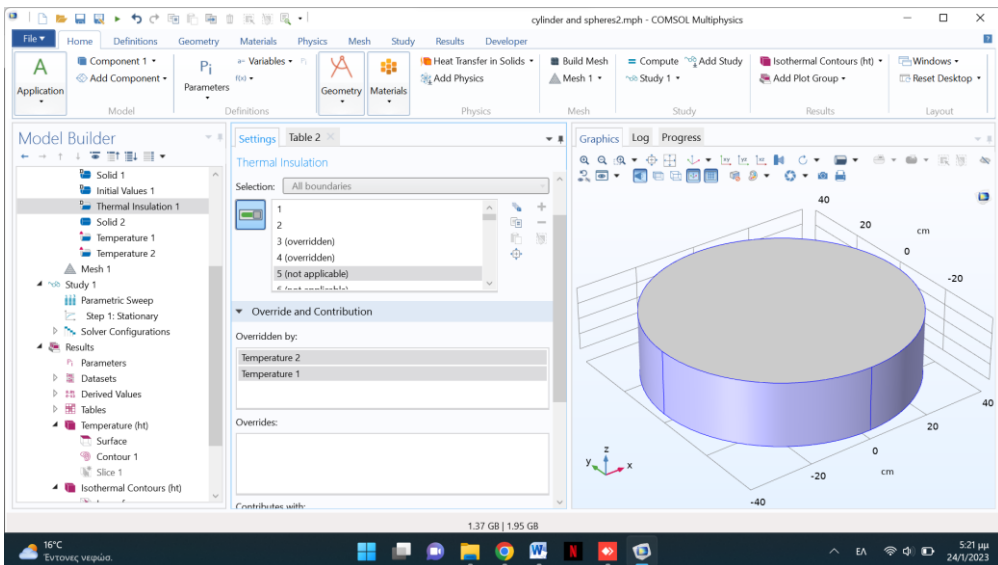
Σχήμα 3.4:Κάτω όριο θερμοκρασίας

Ορίζεται μια θερμοκρασία $T_2 = 273\text{K}$ στο άνω όριο της γεωμετρίας η οποία έχει τεθεί ως ελάχιστη.



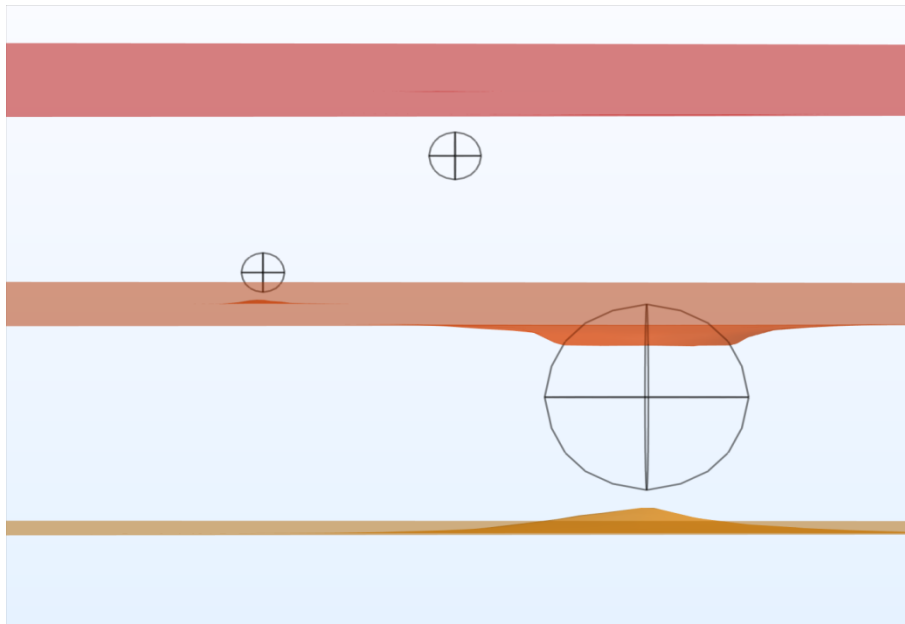
Σχήμα 3.5: Άνω όριο θερμοκρασίας

Οι υπόλοιπες πλευρές του κυλίνδρου έχουν μονωθεί.



Σχήμα 3.6: Μόνωση πλαϊνών πλευρών

Παρακάτω παρατηρείται η επίδραση των σφαιρών στο εύρος θερμοκρασίας που έχει οριστεί στα άκρα του κυλίνδρου στο εσωτερικό του υλικού όπου φαίνεται καθαρά ότι οι σφαίρες επηρεάζουν τη ροή.



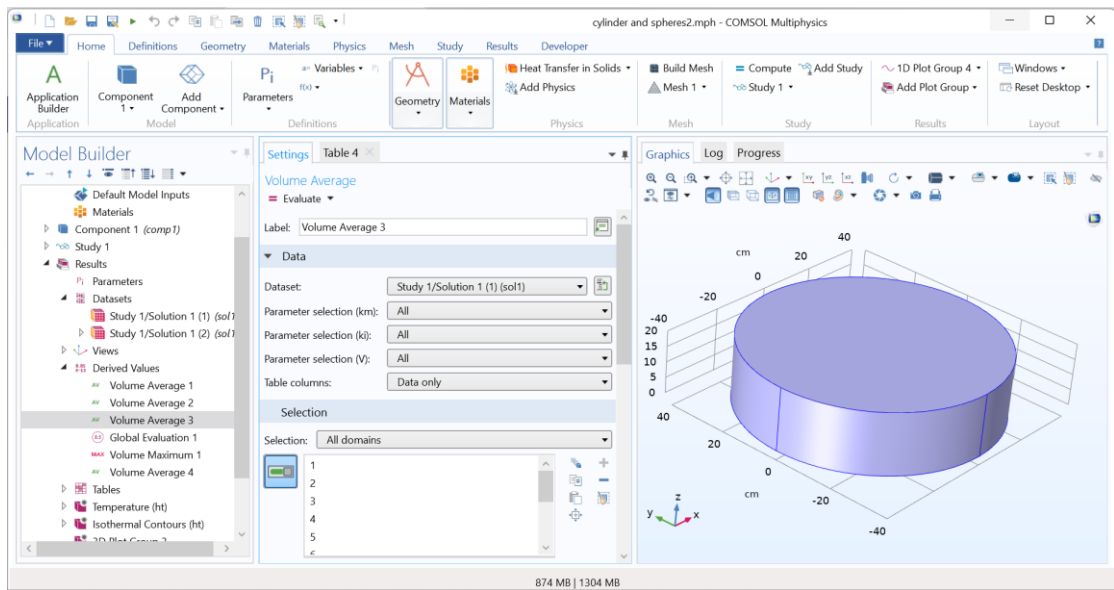
Σχήμα 3.7: Επίδραση θερμοκρασίας στις σφαίρες ισοθερμικά

Στην παραπάνω εικόνα η οποία είναι μικροσκοπική απεικόνιση του άξονα yz φαίνεται ότι η θερμοκρασία πάνω και κάτω από τη σφαίρα παρουσιάζει μια παραμόρφωση σαν μια καμπύλη, έτσι η επιρροή των σφαιρών στο εύρος θερμοκρασίας είναι φανερή.

Αφού ολοκληρωθεί η προσομοίωση και υπολογιστεί το θερμοκρασιακό πεδίο και η ροή θερμότητας σε μόνιμη κατάσταση, τότε από την εξίσωση του Fourier μπορεί να υπολογιστεί ο ισοδύναμος συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, $k_{m,i}$, του ετερογενούς υλικού με τις 10 σφαίρες, ως ακολούθως:

Αρχικά υπολογίζεται ο τοπικός συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας σε κάθε σημείο

$$\dot{q} = -k_l \cdot \frac{dT}{dx} \rightarrow k_l = \frac{\dot{q}}{\frac{dT}{dx}}$$



Σχήμα 3.8: Υπολογισμός ισοδύναμης θερμικής αγωγιμότητας

και στην συνέχεια με υπολογίζεται ο ισοδύναμος συντελεστής για όλου το υλικό.

$$k_{m,i} = \frac{1}{V} \iiint_0^V k_i dV$$

Στην συγκεκριμένη προσομοίωση έχει οριστεί η τιμή $k_m=0.47$ για τον θερμική αγωγιμότητα της μήτρας που αντιπροσωπεύει την τσιμεντοκονία, και $k_i=0.05$ η αντίστοιχη θερμική αγωγιμότητα του μονωτικού υλικού (αερογέλης).

Η ισοδύναμη θερμική αγωγιμότητα υπολογίστηκε ίση με $k_{m,i}=0.46996\text{W}/(\text{mK})$

Παρακάτω παρατηρούμε ότι έχουμε μικρή αλλαγή στην θερμική αγωγιμότητα του αναμειγνυμένου υλικού από 0.47 σε 0.46996 λόγω των σφαιρών.

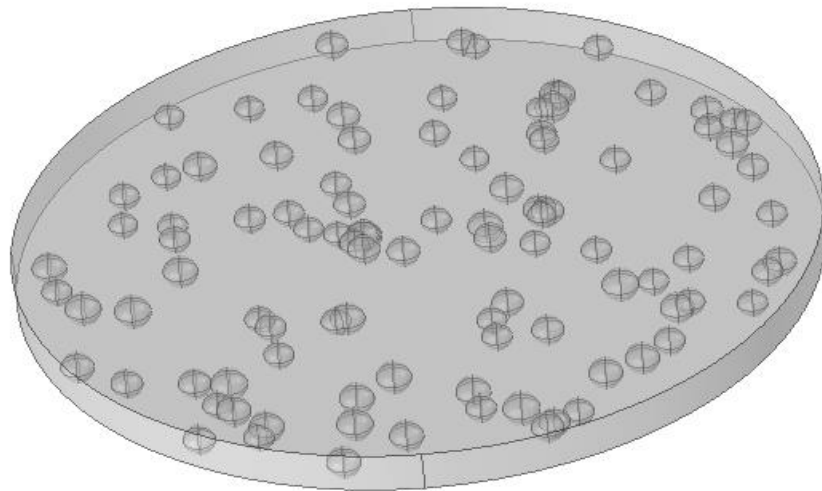
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Προσομοιώσεις- Αποτελέσματα

4.1 Επίλυση προβλήματος θερμικής αγωγής στον εξομοιωτή

Δομή 100 σφαιρών

Επανάληψη της προσομοίωσης αυξάνοντας τις σφαίρες από 10 σε 100 μικραίνοντας τις διαστάσεις του κυλίνδρου (σε κλίμακα μm) και αυξάνοντας τη διάμετρο σφαιρών έτσι ώστε να αυξηθεί ο λόγος μονωτικού/μήτρα και συνεπώς οι θερμομονωτικές ιδιότητες του υλικού, που αποτελεί και απώτερο σκοπό της συγκεκριμένης μελέτης.

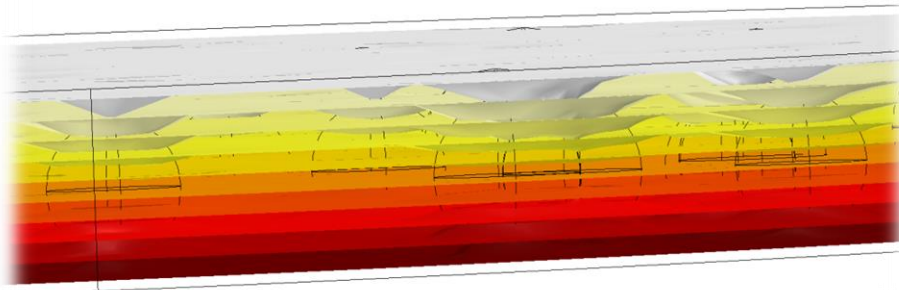


Σχήμα 4.1: Απεικόνιση 100 σφαιρών

Παρακάτω φαίνονται οι αλλαγές στα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν.

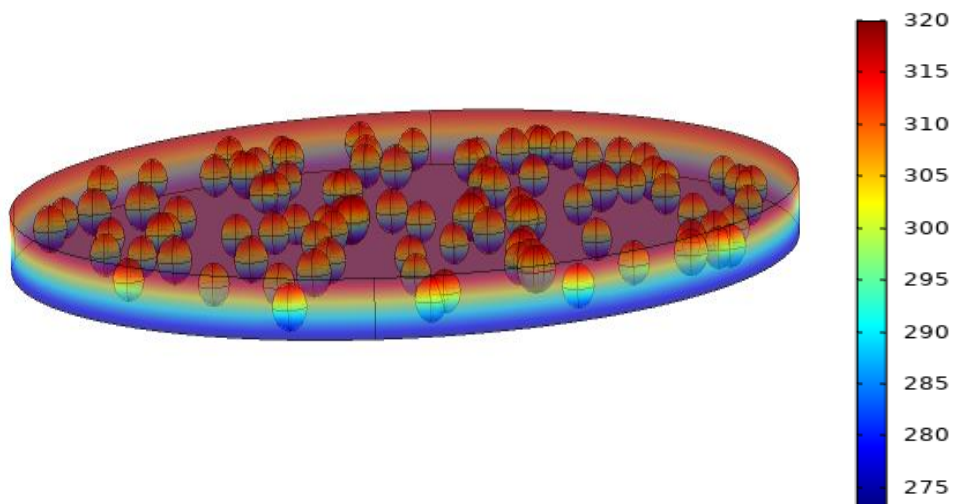
Name	Expression	Value	Description
RIND_THI...	0.0	0	μm
HEIGHT	0.023	0.023	μm
RADIUS	0.22	0.22	μm
T1	320	320	K
T2	273	273	K
L	0.023	0.023	μm
R	0.22	0.22	μm
V	$\pi \cdot R^2 \cdot L$	0.0034972	μm ³
km	0.47	0.47	(W/m ² K)
ki	0.005	0.005	(W/m ² K)

Σχήμα 4.2: Εισαγωγή δεδομένων



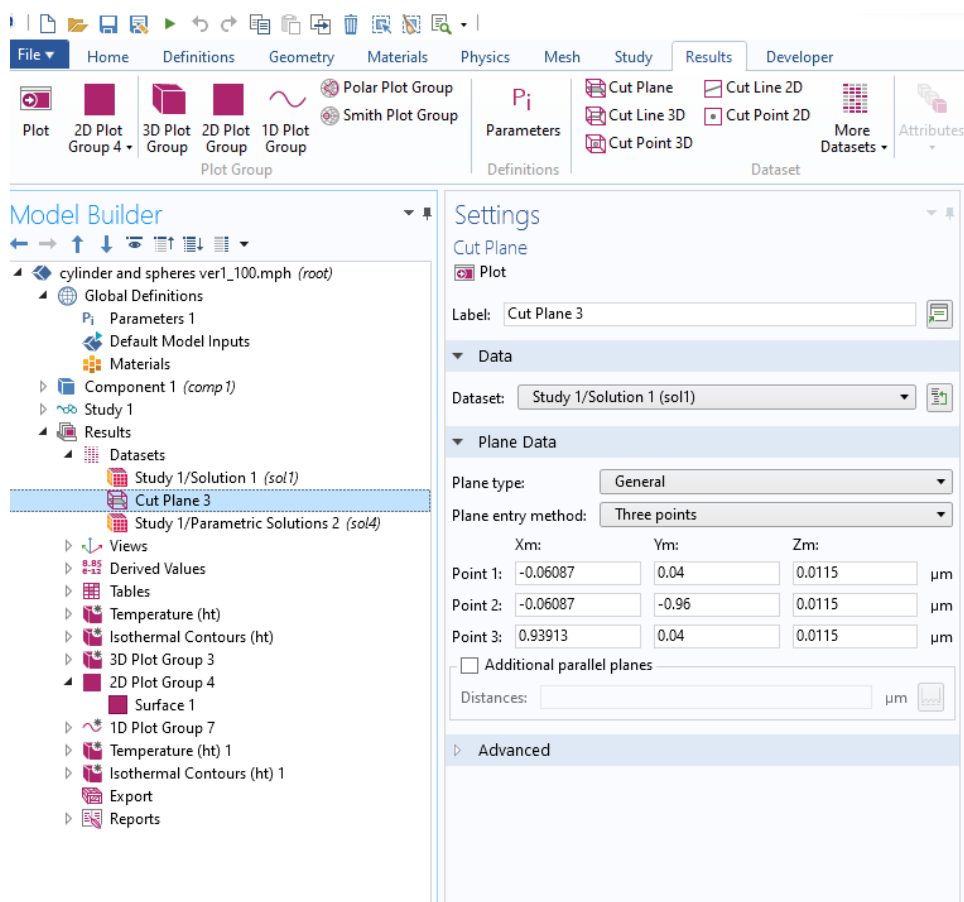
Σχήμα 4.3: Ισοϋψείς θερμοκρασιακής κατανομής σε τομή του υλικού

Κατανομή θερμοκρασίας στο ετερογενές υλικό



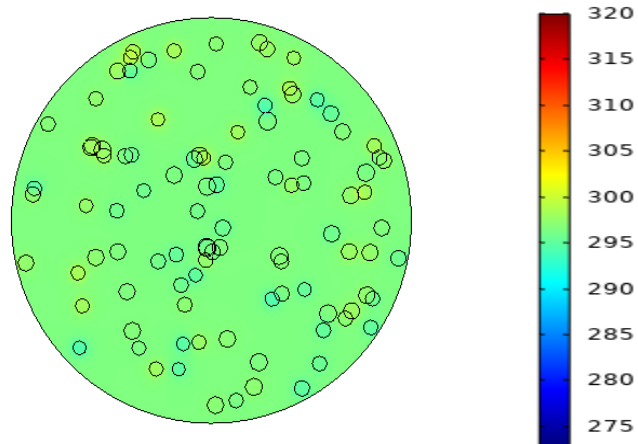
Σχήμα 4.4: Ισοϋψείς θερμοκρασιακής κατανομής στο υλικού

Λαμβάνουμε ενδεικτική τομή του υλικού κατά μήκος του xy plane μέσω της εντολής «cut plane» του προγράμματος comsol στην καρτέλα που φαίνεται παρακάτω:



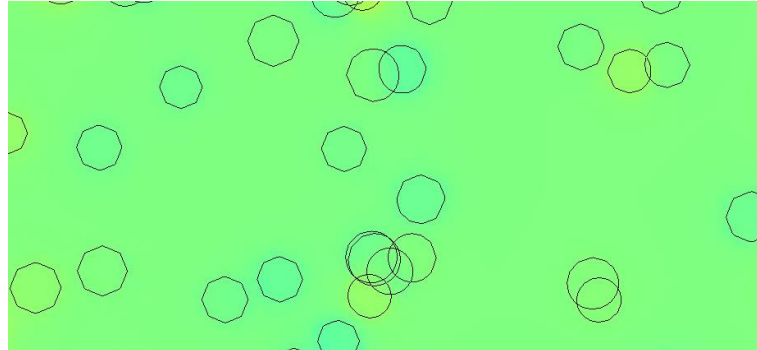
Σχήμα 4.5: Καρτέλα δημιουργίας επίπεδης τομής

Με αυτό τον τρόπο παρατηρούμε την κατανομή της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του υλικού.



Σχήμα 4.6: Τομή στον άξονα xy

Παρακάτω μπορεί να παρατηρηθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια, ότι ανάλογα με τη θέση που έχει τοποθετηθεί κάθε σφαίρα κατά τον z άξονα, έχει διαφορετική θερμοκρασία σύμφωνα με το θερμοκρασιακό πεδίο που υπολογίστηκε με την προσομοίωση.

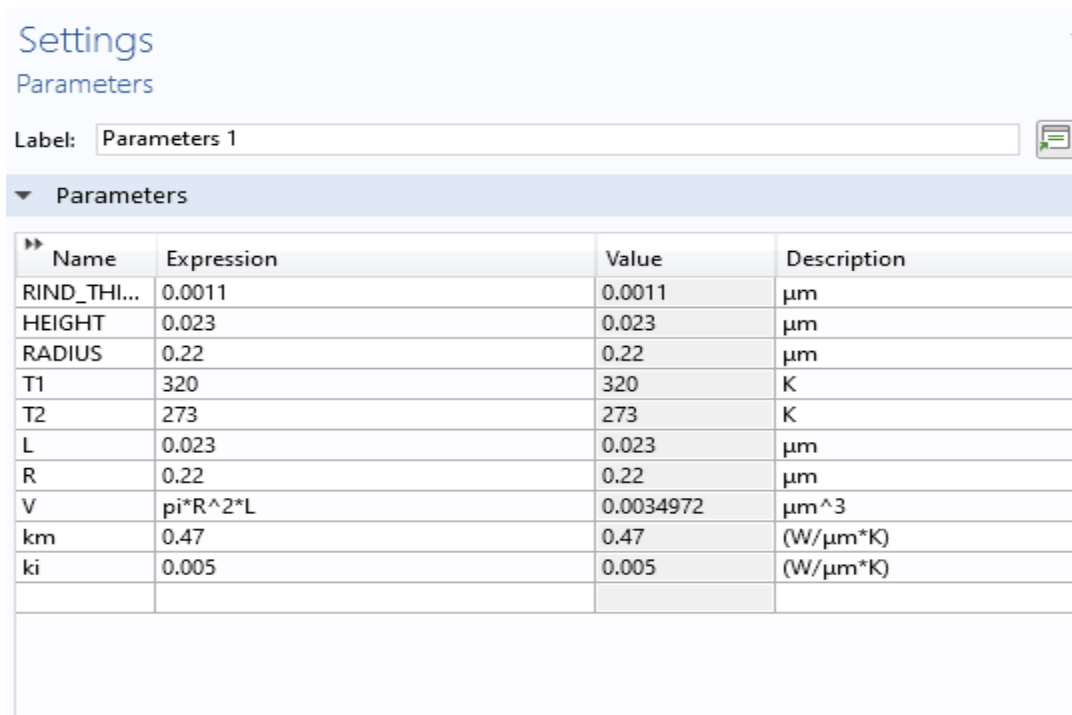


Σχήμα 4.7: Μικροσκοπική απεικόνιση του xy plane με τομή

Στην συγκεκριμένη προσομοίωση το αγώγιμο υλικό καταλαμβάνει το 7,3% του υλικού και η ισοδύναμη θερμική αγωγιμότητα στον z άξονα υπολογίστηκε ίση με $k_{m,i}=0.43609\text{W}/(\text{mK})$, μειώνοντας την θερμική αγωγιμότητας της σκέτης τσιμεντοκονίας ($k_m=0.47\text{ W}/(\text{mK})$).

Δομή 500 σφαιρών

Επαναλαμβάνεται την ίδια διαδικασία τρέχοντας το πρόγραμμα για 500 σφαίρες με τα παρακάτω δεδομένα:



The screenshot shows a 'Settings Parameters' window with a table of parameters. The table has four columns: Name, Expression, Value, and Description. The parameters listed are RIND_THI..., HEIGHT, RADIUS, T1, T2, L, R, V, km, and ki.

Name	Expression	Value	Description
RIND_THI...	0.0011	0.0011	μm
HEIGHT	0.023	0.023	μm
RADIUS	0.22	0.22	μm
T1	320	320	K
T2	273	273	K
L	0.023	0.023	μm
R	0.22	0.22	μm
V	$\pi * R^2 * L$	0.0034972	μm ³
km	0.47	0.47	(W/μm*K)
ki	0.005	0.005	(W/μm*K)

Σχήμα 4.8: Δεδομένα προσομοίωσης 500 σφαιρών

Εισάγονται τα παραπάνω δεδομένα στον κώδικα που έχει επιλεγθεί.

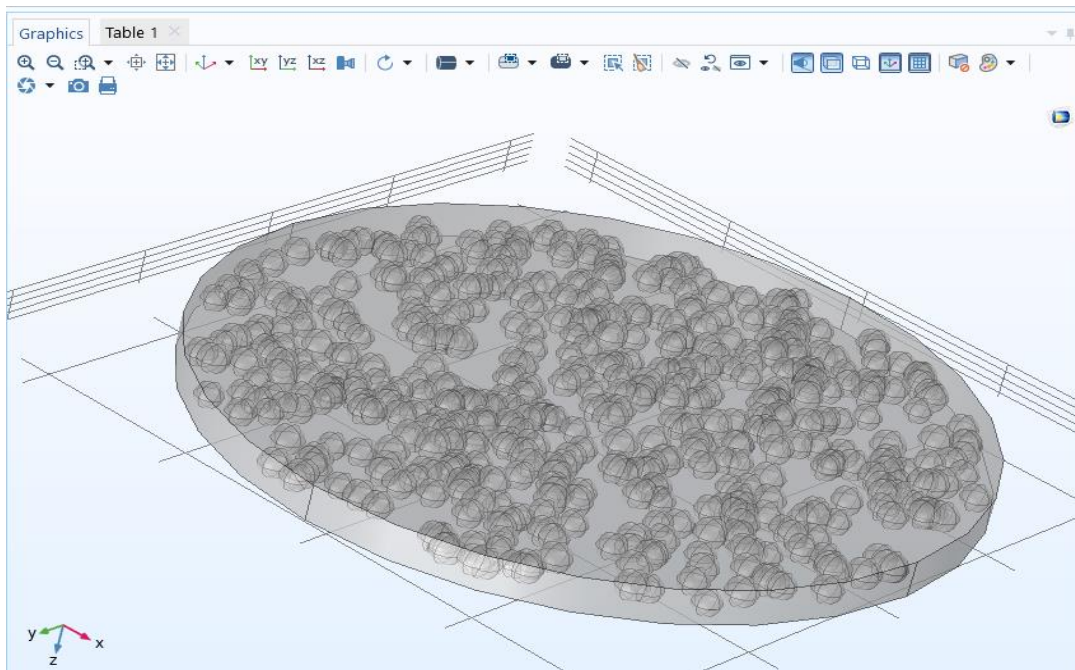
```

form1 x method1 x
1 int NUMBER_OF_HOLES = 500;
2 int ind = 0;
3 double hx, hy, hz, hr = 0.0;
4 double HEIGHT = 0.023;
5 double RADIUS = 0.22;
6 double RIND_THICKNESS = 0.0011;
7 double HOLE_MIN_RADIUS = 0.008;
8 double HOLE_MAX_RADIUS = 0.010;
9 model.component("comp1").geom("geom1").lengthUnit("μm");
10 model.component("comp1").geom("geom1").selection().create("cshell", "CumulativeSelection");
11 while (ind < NUMBER_OF_HOLES) {
12     hx = (2.0*Math.random()-1.0)*RADIUS;
13     hy = (2.0*Math.random()-1.0)*RADIUS;
14     hz = Math.random()*HEIGHT;
15     hr = Math.random()*(HOLE_MAX_RADIUS-HOLE_MIN_RADIUS)+HOLE_MIN_RADIUS;
16     if ((Math.sqrt(hx*hx+hy*hy)+hr) > RADIUS-RIND_THICKNESS) {continue;}
17     if (((hz-hr) < RIND_THICKNESS) || ((hz+hr) > HEIGHT-RIND_THICKNESS)) {continue;}
18     model.component("comp1").geom("geom1").create("sph"+ind, "Sphere");
19     model.component("comp1").geom("geom1").feature("sph"+ind).set("r", hr);
20     model.component("comp1").geom("geom1").feature("sph"+ind).set("pos", new double[]{hx, hy, hz});
21     model.component("comp1").geom("geom1").feature("sph"+ind).set("contributeto", "cshell");
22     ind++;
23 }
24 model.component("comp1").geom("geom1").create("cy12", "Cylinder");
25 model.component("comp1").geom("geom1").feature("cy12").set("r", RADIUS);
26 model.component("comp1").geom("geom1").feature("cy12").set("h", HEIGHT);
27 model.component("comp1").geom("geom1").create("un1", "Union");
28 model.component("comp1").geom("geom1").feature("un1").selection("input").set("cy12");
29 model.component("comp1").geom("geom1").feature("un1").selection("input2").named("cshell");
30 model.component("comp1").geom("geom1").run();
31

```

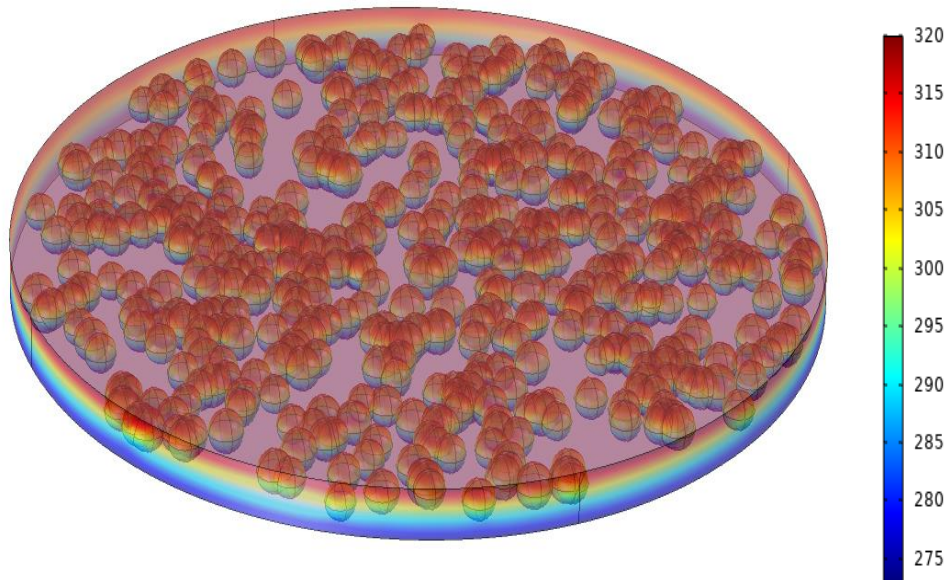
Σχήμα 4.9: Κώδικας δημιουργίας δομής 500 σφαιρών

Η γεωμετρία που προκύπτει φαίνεται παρακάτω:

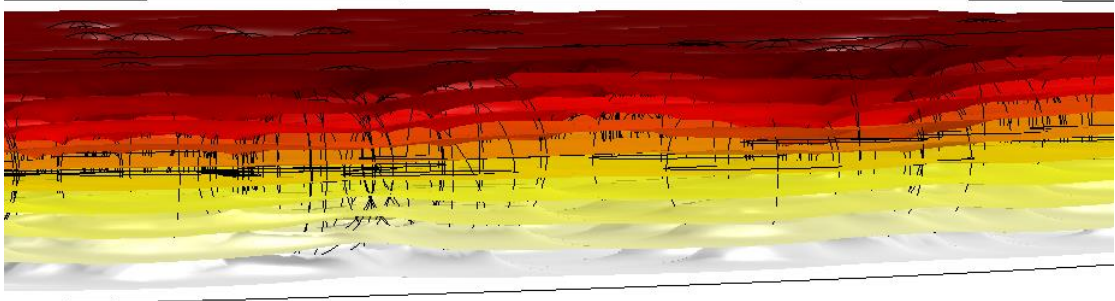


Σχήμα 4.10: Γεωμετρία με 500 σφαίρες

Κατανομή θερμοκρασίας T1-T2



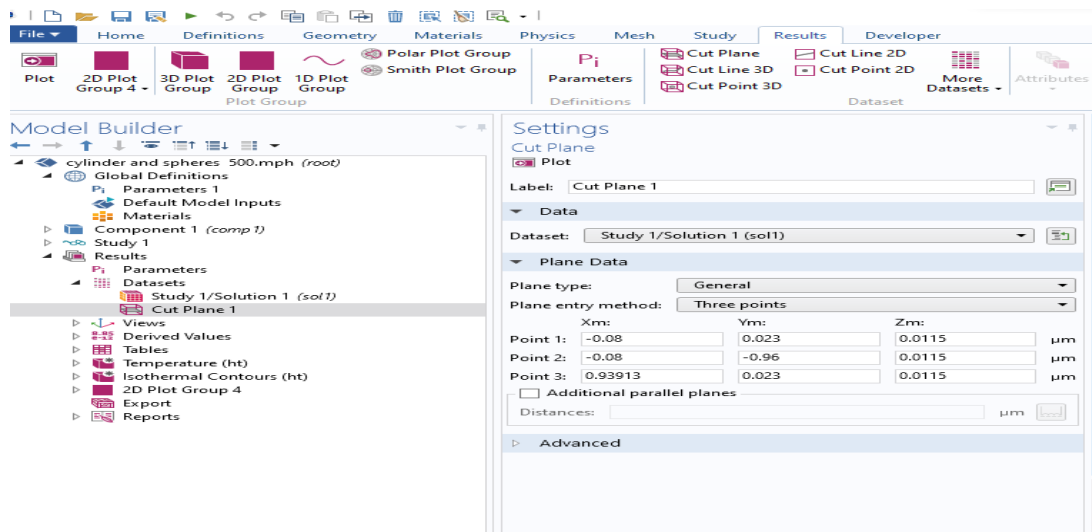
Σχήμα 4.11: Ισοϋψείς θερμοκρασιακής κατανομής στο υλικό



Σχήμα 4.12: Ισοϋψείς θερμοκρασιακής κατανομής σε τομή του υλικού

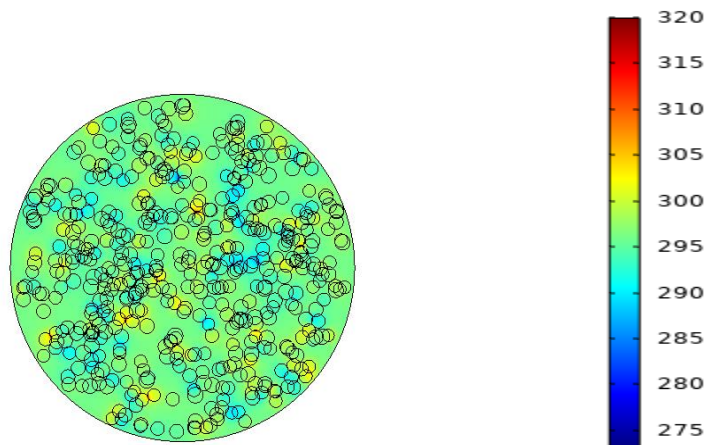
Παρακάτω απεικονίζεται η κατανομή του πεδίου θερμοκρασίας των σφαιρών σε τομή στον άξονα xy plane με ορισμένες συντεταγμένες όπως και στην προηγούμενη προσομοίωση.

Συντεταγμένες που δόθηκαν φαίνονται στην εικόνα:



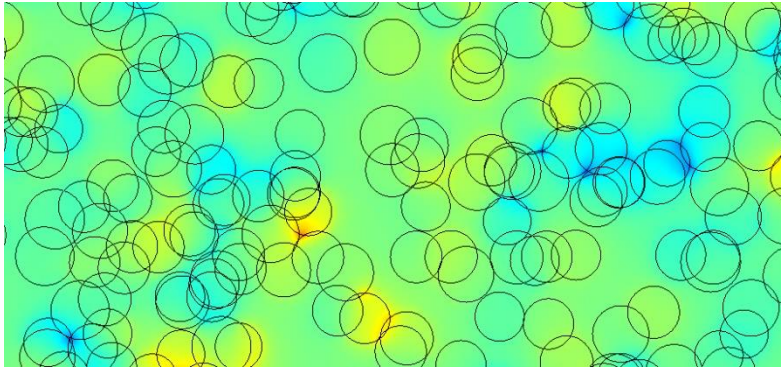
Σχήμα 4.13: Καρτέλα δημιουργίας επίπεδης τομής

Κατανομή θερμοκρασίας στο εσωτερικό των σφαιρών



Σχήμα 4.14: Τομή στον άξονα xy

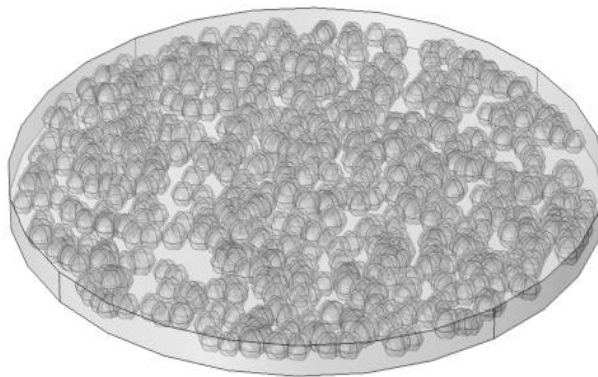
Ακολουθεί μικροσκοπική απεικόνιση της προηγούμενης εικόνας



Σχήμα 4.15: Μικροσκοπική απεικόνιση του xy plane με τομή

Στην περίπτωση των 500 σφαιρών μονωτικού υλικού (αερογέλη) το ποσοστό του μονωτικού υλικού ανέρχεται σε 30% του ετερογενούς υλικού. Η ισοδύναμη θερμική αγωγιμότητα σε αυτή την περίπτωση υπολογίστηκε από την προσομοίωση, ίση με $k_{i,m}=0.32842\text{W}/(\text{mK})$, που είναι αρκετά μικρότερη από την αντίστοιχη θερμική αγωγιμότητα της σκέτης τσιμεντοκονίας ($k_m=0.47\text{ W}/(\text{mK})$).

Δομή 800 σφαιρών

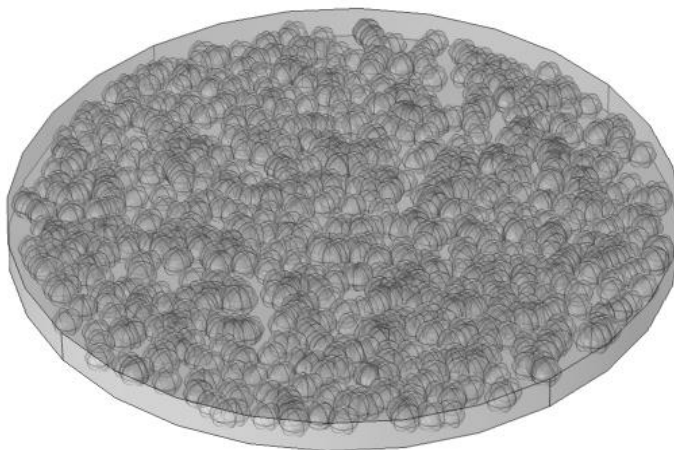


Σχήμα 4.16: Δομή υλικού με 800 σφαίρες

Στις 800 σφαίρες μονωτικού υλικού (αερογέλη) το ποσοστό του μονωτικού υλικού ανέρχεται σε 41% του ετερογενούς υλικού. Η ισοδύναμη θερμική αγωγιμότητα σε αυτή την περίπτωση υπολογίστηκε από την προσομοίωση, ίση με

$k_{i,m}=0.27813\text{W}/(\text{mK})$, που είναι αρκετά μικρότερη από την αντίστοιχη θερμική αγωγιμότητα της σκέτης τσιμεντοκονίας ($k_m=0.47\text{ W}/(\text{mK})$).

Δομή 1000 σφαιρών



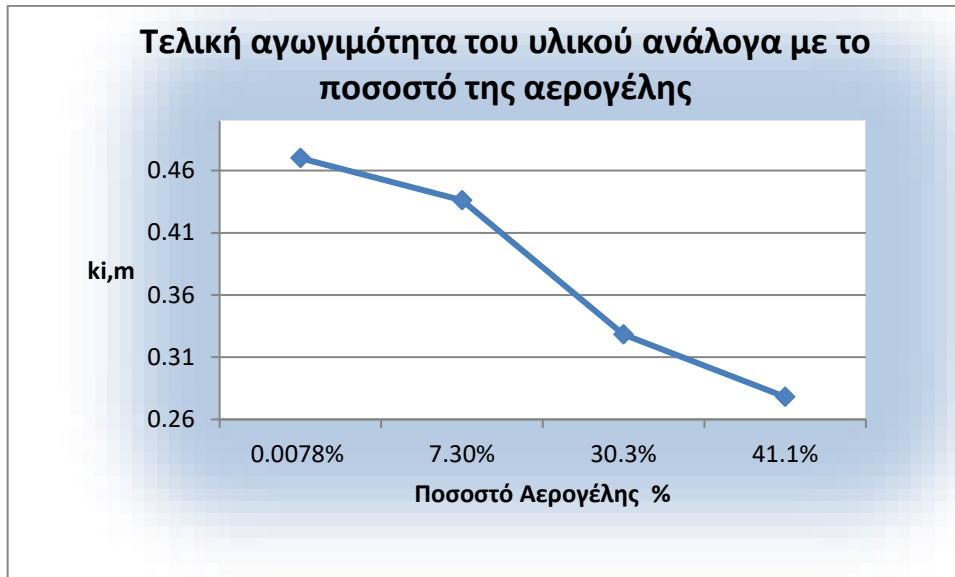
Σχήμα 4.16: Δομή υλικού με 1000 σφαίρες

Στην συγκεκριμένη δομή το ποσοστό του μονωτικού υλικού ανέρχεται σε 51%. Δεν έχουν ληφθεί αποτελέσματα λόγω προβλήματος του mesh που εξηγείται στην συνέχεια.

4.3 Αποτελέσματα και Συμπεράσματα

Αριθμός Σφαιρών	V_{cyl} (μm^3)	V_{sph} (μm^3)	Πορώδες	k_i	k_m	$K_{i,m}$
10	0.10053	0.0000078744	0.0078%	0.005	0.47	0.46996
100	0.0034962	0.0002555	7.30%	0.005	0.47	0.43609
500	0.0034962	0.0010598	30.3%	0.005	0.47	0.32842

800	0.0034962	0.0014371	41.1%	0.005	0.47	0.27813
-----	-----------	-----------	-------	-------	------	---------



Σχήμα 4.17: Δομή υλικού με 1000 σφαίρες

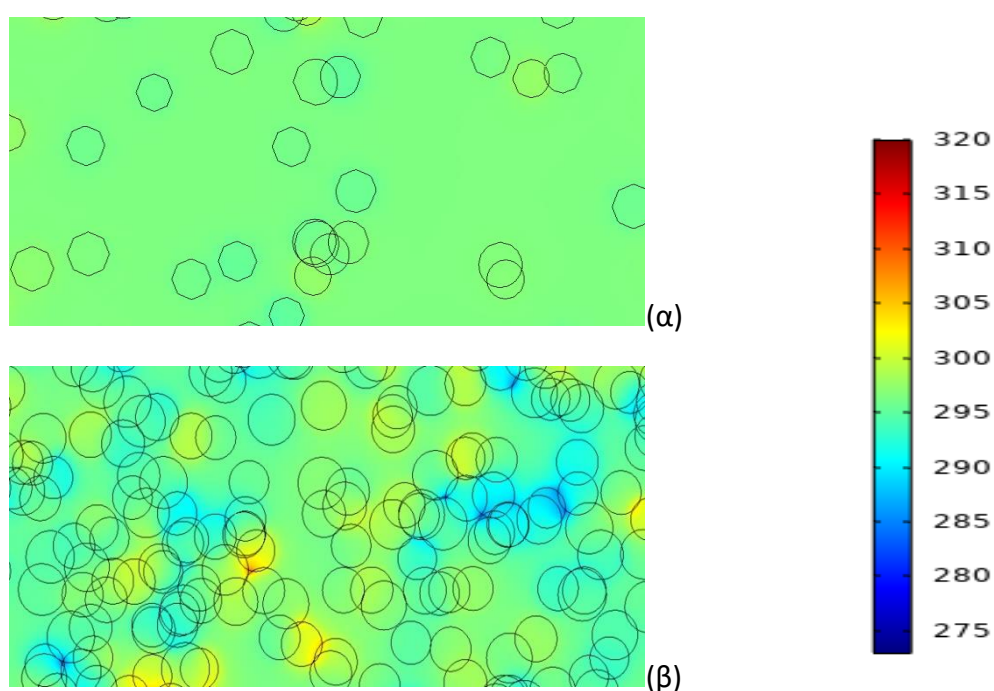
Σύμφωνα, με τα παραπάνω αποτελέσματα παρατηρήθηκε ότι η θερμική αγωγιμότητα του ετερογενούς υλικού μειώνεται σημαντικά όσο αυξάνεται το πορώδες της αερογέλης όπου στις προσομοιώσεις απεικονίζεται σε σχήμα σφαιρών. Άρα, η αερογέλη μπορεί να θεωρηθεί ως ένας καλός μονωτής του μέλλοντος με μεγάλο εύρος θερμικών ιδιοτήτων ανάλογα με το ποσοστό πορώδους που επιλέγεται σε κάθε περίπτωση. Συμπερασματικά, αποδεικνύεται ότι η αερογέλη μπορεί να καλύψει από μικρές έως και πολύ μεγάλες θερμικές απαιτήσεις, πράγμα που καλείται απαραίτητο στις μέρες μας λόγω μεγάλων αλλαγών του κλίματος όπου προβλέπονται μεγάλες θερμοκρασιακές διαφορές στην ατμόσφαιρα και συνεπώς μεγαλύτερες θερμικές παρεμβολές στις οικίες και μεγαλύτερη δυσκολία διατήρησης της εσωτερικής θερμοκρασίας.

Εσκεμμένα κενή σελίδα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Συμπεράσματα – Προτάσεις μελλοντικής εργασίας

5.1 Σύγκριση προσομοιώσεων σε τομή μικροσκοπικής απεικόνισης



Σχήμα 5.1: Μικροσκοπική απεικόνιση τομής (α) 100 και (β) 500 σφαιρών

Συγκρίνοντας τις παραπάνω προσομοιώσεις, γίνεται φανερή η επιρροή των σφαιρών στην ροή της θερμοκρασίας. Όσο, αυξάνεται το ποσοστό πορώδους τόσο μεγαλύτερη επίδραση έχουν οι σφαίρες στην εμπόδιση εισόδου της θερμότητας. Αυτό, διαπιστώνεται παρατηρώντας ότι στην 1^η εικόνα με ποσοστό πορώδους 7,3% η θερμοκρασία σχεδόν κυριαρχεί σε όλο το υλικό ενώ αντίστοιχα στην 2^η εικόνα όπου το πορώδες έχει αυξηθεί σε 30 %, παρουσιάζεται μια ανομοιομορφία πράγμα που επιβεβαιώνει την εμπλοκή των σφαιρών στο θερμοκρασιακό πεδίο ανάλογα με το ποσοστό που καλύπτει σε κάθε περιοχή.

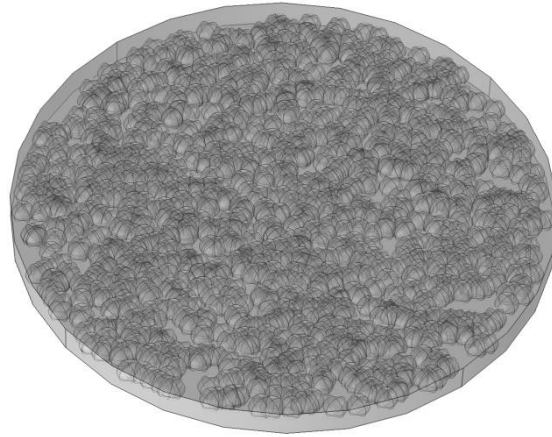
Στόχος της παρούσας εργασίας ήταν να εξεταστεί αν το ετερογενές υλικό με την προσθήκη αερογέλης μπορεί να βελτιώσει την θερμομονωτική ικανότητα του κελύφους, με συνέπεια να εμποδίσει την είσοδο της ροής θερμότητας σε ένα κτίριο και να συγκριθεί με τα βέλτιστα συμβατικά θερμομονωτικά υλικά που διατίθενται στην αγορά με συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας να κυμαίνονται σε εύρος 19-100 mW/(K·m) όπως αναφέρθηκε και παραπάνω σε συνδυασμό με την τσιμεντοκονία η οποία έχει ένα μέτριο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, της τάξης των 470 mW/(K·m).

Αρχικός στόχος της δεδομένης έρευνας ήταν να επιτευχθεί το μονωτικό να αποτελεί άνω του 60% του ετερογενούς υλικού, όμως λόγω αδυναμίας στη δημιουργία του mesh του προγράμματος comsol, η μελέτη έφτασε το 41,1%. Παρόλα αυτά, τα αποτελέσματα που πάρθηκαν αρκούν για να διαπιστωθεί η σημαντική πτώση της θερμικής αγωγιμότητας του τελικού υλικού συγκριτικά με την αρχική θερμική αγωγιμότητας της τσιμεντοκονίας που ήταν 0.47 mW/(K·m) ως ένα υλικό ενώ με την ανάμειξη της αερογέλης σε αναλογία 41% κατάφερε να μειωθεί σε 0.278 W/(m·K). Προφανώς η περαιτέρω αύξηση της αερογέλης στο ετερογενές υλικό θα επιφέρει καλύτερες θερμομονωτικές ιδιότητες αλλά ταυτόχρονα θα πρέπει να ελεγχθούν και οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού καθώς και διαχειρισιμότητα του στην σύνθεση και την εφαρμογή του σε τοιχοποιίες.

5.2 Προτάσεις για μελλοντική εργασία

Μελλοντικά χρησιμοποιώντας ένα πρόγραμμα καλύτερης διακριτοποίησης και ευελιξίας (Meshing), έτσι ώστε να επιτευχθεί ικανός αριθμός σφαιρών ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή αναλογία μονωτικού υλικού. όπου ο αρχικός στόχος που ήταν το 80%.

Παρακάτω απεικονίζεται η γεωμετρία 1500 σφαιρών με αναλογία αερογέλης σε ποσοστό 59%.



Σχήμα 5.2: Δομή υλικού με 1500 σφαίρες

Εσκεμμένα κενή σελίδα

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

A. Γενικές αναφορές

1. Θέρμανση – Κλιματισμός, Β.Η. ΣΕΛΛΟΥΝΤΟΣ
2. Μεταφορά Μάζας και Θερμότητας, 5η Έκδοση Βελτιωμένη, Cengel Yunus., Ghajar A., Παναγιώτης Τσιακάρας (επιμέλεια)
3. *Μετάδοση Θερμότητας και Συσκευές Διεργασιών*, Απόστολος Πολυζάκης, Σταμάτης Ζώρας. Κων/νος Παπαγεωργίου

B. Αναφορές επί κειμένου

- 1 <https://monoseis-online.gr/thermomonosi/>
- 2 Αλεξιάδης
- 3 Bioclima
- 4 <https://bioclima.gr/nea/vasikes-ennoies-thermomonosis>
- 5 ISOMAT
- 6 <https://www.petros-lorenc.gr/θερμομόνωση-κατοικίας/>
- 7 <https://kouremenos.net/product/knauf-aquapanel>
- 8 <https://create.vista.com/el/photos/Poliestireno/>
- 9 <https://www.igeorgopoulos.gr/products/thermomonosi>
- 10 <https://www.cabotcorp.com/solutions/products-plus/aerogel>
- 11 <http://m.gr.greenenergyrefractarios.com>
- 12 <https://greek.botianchemical.com/supplier-466093-aerogel-powder>
- 13 Μετρήσεις Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης ΙΤΕ/ΙΕΧΜΗ
- 14 Φυσική για επιστήμονες και μηχανικούς: μηχανική, ταλαντώσεις και μηχανικά κύματα, θερμοδυναμική, σχετικότητα, Raymond A. Serway, John W. Jewett